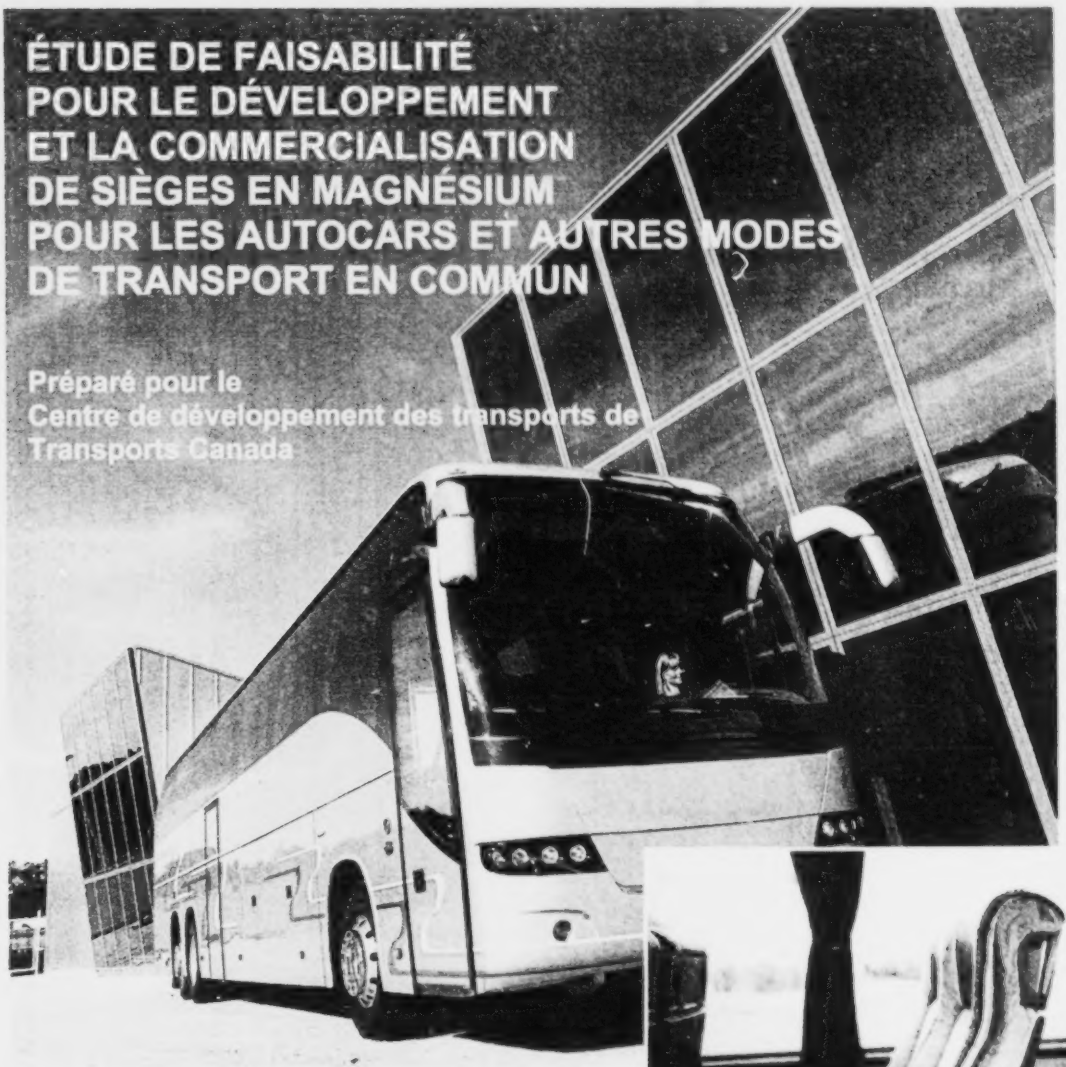
TP 14275F

ÉTUDE DE FAISABILITÉ POUR LE DÉVELOPPEMENT ET LA COMMERCIALISATION DE SIÈGES EN MAGNÉSIUM POUR LES AUTOCARS ET AUTRES MODES DE TRANSPORT EN COMMUN

Préparé pour le
Centre de développement des transports de
Transports Canada



ic² technologies

Jean-François Audet
Courtier Stratège

Juin 2004

105-01701/

TP 14275F

Étude de faisabilité pour le développement et la commercialisation de sièges en magnésium pour les autocars et autres modes de transport en commun

par

François Bergeron, IC^2 Technologies inc.
Jean-François Audet, J-F Audet Courtier Stratège

Juin 2004

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles du Centre de développement des transports de Transports Canada ou des organismes parrains.

Le Centre de développement des transports n'a pas l'habitude de citer des noms de produits ou de fabricants. S'il le fait ici, c'est simplement pour la bonne compréhension du texte.

Ce rapport n'utilise pas toujours les unités du Système international, étant donné que dans le secteur d'activités concerné les unités impériales sont d'usage courant.

Sauf avis contraire, toutes les valeurs monétaires mentionnées sont en dollars canadiens.

Équipe de projet

François Bergeron, ing., M.Sc.A., chef de projet
fbergeron@ic2tech.com

Jean-François Audet, M.Sc., M.B.A., consultant en stratégie d'affaires
jfaudet@audet-strategies.ca

This report is also available in English under the title "*Feasibility Study for the Development and Marketing of Magnesium Seats for Motor Coaches and Other Modes of Public Transit*", TP 14275E.

Transports Canada Transport Canada

FORMULE DE DONNÉES POUR PUBLICATION

1. N° de la publication de Transports Canada	2. N° de l'étude	3. N° de catalogue du destinataire
TP 14275F	5488-89	

4. Titre et sous-titre

Étude de faisabilité pour le développement et la commercialisation de sièges en magnésium pour les autocars et autres modes de transport en commun

5. Date de la publication

Juin 2004

6. N° de document de l'organisme exécutant

7. Auteur(s)

François Bergeron et Jean-François Audet

8. N° de dossier - Transports Canada

2450-JP06

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant

IC² Technologies inc.
4800, rue Rideau
Québec (Québec)
G1P 4P4

J-F Audet Courtier Stratège
1838, rue Marie-Dubois
Carignan (Québec)
J3L 3P9

10. N° de dossier - TPSGC

MTB-3-01286

11. N° de contrat - TPSGC ou Transports Canada

T8200-033529/001/MTB

12. Nom et adresse de l'organisme parrain

Centre de développement des transports (CDT)
800, boul. René-Lévesque Ouest
Bureau 600
Montréal (Québec)
H3B 1X9

13. Genre de publication et période visée

Finale

14. Agent de projet

Claude Guérette

15. Remarques additionnelles (programmes de financement, titres de publications connexes, etc.)

Projet coparrainé par le Programme de recherche et développement énergétiques (PRDE) de Ressources naturelles Canada

16. Résumé

La présente étude a été réalisée afin de lever certaines incertitudes face à l'utilisation du magnésium pour la fabrication de sièges plus légers pour le secteur du transport en commun et plus particulièrement pour le secteur des autocars. Cette étude a permis de valider la faisabilité d'un siège pour passager en magnésium et/ou aluminium rencontrant les objectifs de réduction de poids et de coût recherchés par l'industrie.

Le marché nord-américain des autobus et des autocars a été évalué, les différentes normes de conception de sièges pour passagers en Amérique du Nord, en Europe et en Australie révisées et des échantillons de magnésium ont été testés afin de s'assurer que ce matériau répondait aux normes de l'industrie de transport de masse quant à l'inflammabilité des matériaux et l'émission de fumée toxique pouvant être émise lors d'une exposition à des chaleurs intenses.

Une évaluation des coûts de fabrication d'un siège pour passager à l'aide de différentes technologies de moulage a été réalisée afin de comparer la compétitivité d'une solution utilisant le magnésium et/ou l'aluminium en référence avec la solution conventionnelle en acier. L'étude de cas réalisée permet de conclure qu'une solution de sièges plus légers est à la fois possible techniquement et viable économiquement.

17. Mots clés	18. Diffusion
Magnésium, aluminium, siège, passager, autocar, autobus, allégement, inflammabilité, coût, faisabilité	Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.

19. Classification de sécurité (de cette publication)	20. Classification de sécurité (de cette page)	21. Déclassification (date)	22. Nombre de pages	23. Prix
Non classifiée	Non classifiée	—	xxviii, 86, ann.	Port et manutention

Transport Canada / Transports Canada

PUBLICATION DATA FORM

1. Transport Canada Publication No.	2. Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 14275F	5488-89	

4. Title and Subtitle

Étude de faisabilité pour le développement et la commercialisation de sièges en magnésium pour les autocars et autres modes de transport en commun

5. Publication Date

June 2004

6. Performing Organization Document No.

7. Author(s)

François Bergeron and Jean-François Audet

8. Transport Canada File No.

2450-JP06

9. Performing Organization Name and Address

IC^2 Technologies inc.
4800, rue Rideau
Québec (Québec)
G1P 4P4

J-F Audet Courtier Stratège
1838, rue Marie-Dubois
Carignan (Québec)
J3L 3P9

10. PWGSC File No.

MTB-3-01286

11. PWGSC or Transport Canada Contract No.

T8200-033529/001/MTB

12. Sponsoring Agency Name and Address

Transportation Development Centre (TDC)
800 René Lévesque Blvd. West
Suite 600
Montreal, Quebec
H3B 1X9

13. Type of Publication and Period Covered

Final

14. Project Officer

Claude Guérette

15. Supplementary Notes (Funding programs, titles of related publications, etc.)

Co-sponsored by the Program of Energy Research and Development of Natural Resources Canada

16. Abstract

This study was carried out to address concerns about the use of magnesium to manufacture lighter seats for public transit vehicles, particularly motor coaches. The study helped validate the feasibility of magnesium and/or aluminum passenger seats and whether they would meet the weight and cost reduction objectives sought by the public transportation industry.

In the course of the study, the North American bus and motor coach market was assessed, passenger seat design standards in North America, Europe and Australia were reviewed, and magnesium samples were tested to ensure that this material met public transit industry standards for material flammability and for toxic fumes possibly emitted during exposure to intense heat.

The costs of manufacturing passenger seats using various moulding technologies were assessed in order to compare the competitiveness of a magnesium and/or aluminum solution in relation to the conventional steel solution. It was concluded from the case study carried out that a lighter-seat solution was both technically possible and economically viable.

17. Key Words	18. Distribution Statement
Magnesium, aluminium, seat, passenger, motor coach, bus, weight reduction, flammability, cost and feasibility.	Limited number of copies available from the Transportation Development Centre

19. Security Classification (of this publication)	20. Security Classification (of this page)	21. Declassification (date)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	—	xxviii, 86, apps	Shipping/ Handling

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée grâce à l'étroite collaboration des représentants de Transports Canada et de l'industrie. Plus particulièrement, les auteurs désirent remercier les contributions de Claude Guérette (Transports Canada), Eric Belval et François Giguère (Multina), Alain Dulac et Raymond Blackburn (Prévost Car), Len Miller et John Izydorczy (Meridian Technologies) et Pierre Labelle (Noranda).

Les auteurs tiennent aussi à remercier toutes les personnes qui ont bien voulu répondre à nos questions ou participer à nos entrevues. La liste complète des personnes interviewées est présentée à l'annexe A.

Finalement, les auteurs remercient les firmes qui ont bien voulu consacrer des ressources à la préparation de soumissions qui ont servi à préparer l'étude de cas présentée au chapitre 4 et à fournir des échantillons de magnésium pour la réalisation des tests d'inflammabilité présentés au chapitre 3, soit les firmes Magnesium Elektron, Magparts, Meridian Technologies, Powercast, Thixomat, Thixotech, Thompson et Genistar.

Photos en page couverture, courtoisie de Volvo Bus Corporation. Photos de diverses pièces en magnésium des pages 48 à 51, courtoisie de Meridian Technologies et de Honsel Fonderie Messier.

SOMMAIRE

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

La présente étude a été réalisée pour le Centre de développement des transports (CDT) de Transports Canada afin de lever certaines incertitudes face à l'utilisation du magnésium pour la fabrication de sièges plus légers pour le secteur du transport en commun et plus particulièrement pour le secteur des autocars. L'étude avait pour objectif de valider la faisabilité d'un siège en magnésium et de proposer un plan d'actions permettant le développement et la validation des premiers prototypes.

Bien que des solutions en aluminium soient aussi possibles et considérées dans cette étude, la solution en magnésium est celle qui présente le scénario optimal en termes de réduction de poids et c'est donc le scénario qui sera privilégié afin d'en déterminer la viabilité. Au terme de cette analyse, le lecteur comprendra qu'il y a toute une gamme d'options possibles misant soit sur une solution entièrement en aluminium, entièrement en magnésium ou une combinaison de ces matériaux. Le choix final reposera sur les objectifs particuliers des manufacturiers et les compromis souhaités en termes de réduction de poids, réduction de coûts, confort et sécurité.

Le marché des autocars a été retenu comme le premier marché pouvant bénéficier de sièges en magnésium étant donné la nature même des sièges (plus luxueux et prix plus élevé que dans le secteur du transport urbain) et l'ouverture des manufacturiers nord-américains à ce sujet (comparativement au secteur ferroviaire interurbain typiquement plus conservateur). L'analyse des enjeux et l'étude de cas portent donc sur ce premier marché cible. Néanmoins, l'étude souligne les similitudes entre le marché des autocars et celui des trains qui pourrait constituer un second marché. Une fois les économies d'échelles réalisées, le marché des autobus urbains pourrait certainement à son tour bénéficier de l'expertise développée dans le secteur des autocars.

La réduction du poids des véhicules présente plusieurs avantages reconnus et devient ainsi un enjeu majeur tant pour les considérations environnementales que pour la sécurité routière et l'émergence des énergies nouvelles : réduction de la consommation de carburant, réduction des émissions polluantes, amélioration de la sécurité, faciliter la viabilité des énergies nouvelles et réduction des dommages aux routes.

En 2000, Transports Canada initiait une étude visant à définir le problème de poids des autocars et à réaliser une étude technique de la structure des autocars et de leurs composantes afin d'identifier les avenues d'allégement. Tel que le souligne cette étude, les autocars présentent un problème récurrent de dépassement des limites de poids des différents essieux :

> «*En 1988, un protocole d'entente (PE), élaboré sous l'égide de l'Association des transports du Canada, visait à instaurer une plus grande uniformité des règlements provinciaux relatifs aux poids et dimensions des véhicules. En vertu de ce PE, les limites de poids de l'essieu avant, de l'essieu moteur et de l'essieu traîné ont été établies à 5 500 kg, 9 100 kg et 6 000 kg respectivement. Mais des études ont révélé que sur un total de 140 autocars, 50 % dépassaient les 5 500 kg de limite de*

poids de l'essieu avant. En 1997, la limite de poids de l'essieu avant a été portée à 7 250 kg. Encore là, des études ont montré que sur 200 autocars, 3 % dépassaient la nouvelle limite réglementaire touchant l'essieu avant, et 18 %, la limite de 9 100 kg pour l'essieu moteur. Le dépassement des limites de poids a donc été reconnu comme un problème récurrent. [...]» [1]

Une deuxième phase de cette étude a été déposée au début de 2004 afin de réduire de 20 % la masse à vide d'un autocar de 45 pi, à la faveur d'une conception optimisée et de l'utilisation de matériaux avancés pour les structures du toit et du plancher et d'autres éléments. Bien que le poids des sièges ne représente typiquement que 4 % du poids d'un autobus urbain ou d'un autocar, des économies non négligeables peuvent être obtenues relativement aisément et sans modification majeure du véhicule tel qu'illustré dans ce rapport qui s'inscrit dans la continuité de ces efforts.

MARCHÉ NORD-AMÉRICAIN DU TRANSPORT EN COMMUN

Autocars

On compterait quelque 40 000 autocars en circulation aux États-Unis et 4 000 au Canada. Au niveau des opérateurs de flottes, on en compterait quelque 3 600 aux États-Unis et 400 au Canada, dont près de 90 % compteraient une flotte de moins de 25 véhicules et 75 % compteraient une flotte de moins de 10 véhicules. Les 50 plus importants opérateurs (en terme de véhicules en service) représenteraient environ 30 % du marché des autocars en Amérique du Nord.

Au Mexique, il y aurait entre 30 000 et 40 000 autocars en circulation pour les services interurbains. En fait, ce serait plus de 97 % du transport en commun interurbain au Mexique qui se ferait par autocars, le réseau ferroviaire passager étant pratiquement inexistant et le transport aérien très coûteux. Selon Volvo Bus de Mexico, environ 50 % des autocars mexicains sont de catégorie économique, 42 % serait de catégorie première classe et 8 % de catégorie exécutive.

Les ventes d'autocars aux États-Unis et au Canada auraient totalisé 2 400 unités en 2002 et 1 770 unités en 2003. Après avoir connu une forte croissance dans les années 1990, le marché est en baisse constante depuis 1999 (une baisse cumulée d'environ 50 %). Selon les avis les plus conservateurs, les volumes de ventes reviennent vers la moyenne des dernières décennies, soit de l'ordre de 1 500 unités par année. D'autres avis plus optimistes estiment plutôt que les ventes annuelles devraient revenir à un niveau de 2 800 à 3 200 unités au cours de la période 2004-2007.

Pour le Mexique, les ventes d'autocars auraient totalisé environ 1 900 unités en 2003, soit la moyenne des cinq dernières années. Le marché mexicain a connu une croissance importante entre 1999 et 2001, passant de 1 200 unités à 2 800 unités, pour revenir aux environs de 1 800 à 1 900 unités pour les années 2002 et 2003. Il est important de souligner ici que le marché mexicain est aussi important en taille que le marché canado-américain.

---

[1] Martec Limited, *Intercity Bus Weight Reduction Program – Phase 1*, Transportation Development Centre, Montreal, January 2000, TP 13560E.

Évaluation du marché des sièges passagers

Le tableau 1 présente un aperçu du marché des sièges passagers pour les divers modes de transports en commun terrestre en Amérique du Nord.

Tableau 1. Estimation du marché nord-américain de nouveaux sièges pour le secteur du transport en commun terrestre (véhicules neufs)

	Autobus urbains	Autocars	Trains urbains	Trains interurbains
	Nombre de sièges typiques par véhicule			
	40	50	56	60
	Hypothèses sur le marché annuel des véhicules neufs			
Canada	400	150	80	N/D
États-Unis	4 600	1 350	630	N/D
Mexique	2 500	1 900	N/D	---
	Estimation du nombre de nouveaux sièges			
Canada	15 000	7 500	5 000	N/D
États-Unis	185 000	67 500	35 000	N/D
Mexique	100 000	95 000	N/D	---
Total	**300 000**	**170 000**	**40 000**	**N/D**
	Prix typique par siège double (siège d'origine)			
	400-500 $	700-2 000 $	Métro et trains légers : 450-900 $ Banlieues : 900-2 000 $	1 000-3 000 $

Note : Dans ce tableau, un siège correspond à une place assise.

Les estimations précédentes ne tiennent compte que du marché des véhicules neufs. Il est important de souligner aussi l'existence d'un marché de sièges pour la rénovation de véhicules (particulièrement dans le secteur ferroviaire).

APPLICATIONS EXISTANTES DE SIÈGES EN MAGNÉSIUM

Les structures de sièges sont aujourd'hui une application courante du magnésium dans l'industrie automobile, au même titre que les structures de tableau de bord, les armatures de volant et divers supports. Le procédé utilisé (sauf exception) est le moulage sous haute pression. On retrouve ces sièges dans plusieurs fourgonnettes et voitures de luxes, dans certains TGV et pour certains sièges pour conducteurs de camions lourds.

NORMES POUR LA CONCEPTION DE SIÈGES

Il n'existe pas de normes spécifiques en Amérique du Nord pour la conception de sièges passagers dédiés aux autocars. Exception faite des autobus scolaires où il existe une norme spécifique pour les sièges passagers, les autres normes existantes canadiennes

et américaines concernent principalement les sièges conducteurs ou ceux munis de ceinture de sécurité.

Plusieurs fabricants de sièges américains se réfèrent aux normes de l'APTA (*Standard Bus Procurement Guidelines*). Bien que ces normes soient principalement destinées aux concepteurs de sièges des autobus urbains, elles peuvent aussi servir de référence à la fabrication des sièges pour autocars. Quant aux normes de l'APTA pour les sièges passagers de train de banlieue, elles sont moins sévères que les normes australiennes décrites ci-après.

Tableau 2. Comparatif des normes internationales pour les sièges passagers d'autocars

Type de chargement		Description des cas de chargements	Norme		
			APTA (É.-U.)	CEE 80 (Europe)	ADR 68 (Australie)
	Siège	Force horizontale (appliquée simultanément) – position H1 sur le dossier – position H2 sur le dossier – répartie également sur le dossier	2,23 kN	1,0 kN @ 70-80 cm 2,0 kN @ 45-55 cm	1,0 kN @ 70-80 cm 2,0 kN @ 45-55 cm
		Force verticale - Coussin	2,23 kN	(Voir force sur l'ancrage)	
		Moment sur la partie supérieure du dossier	N/D	N/D	530 N·m
	Ancrage	Force appliquée sur l'ancrage (siège double)	2,25 kN x 2 = 4,5 kN	10 kN	[8,9 kN (coussin) + 17,7 kN (dossier)] x 2 = 53,2 kN
Dynamique	Siège et ancrage	Décélération moyenne (G = 9,81 m/s^2)	10 G	6,5-8,5 G	20 G
		Vitesse minimale du chariot lors de la simulation d'impact	N/D	30-32 km/h	49 km/h
		Vitesse du pendule simulant le choc à la tête	N/D	N/D	6,69 m/s
		Critère d'acceptabilité			
		– tête	< 400	< 500	< 1 000
		– thorax	N/D	< 30 G	< 590 m/s^2 (60 G)
		– fémur	4,45 kN	< 10 kN et la valeur de 8 kN ne doit pas être dépassée pour plus de 3 ms	< 10 kN

La Commission économique européenne (CEE) est l'organisme responsable de légiférer et d'homologuer les sièges de véhicules de grandes dimensions pour le transport de voyageurs en Europe. Malgré que cette norme ne soit pas encore obligatoire, les fabricants d'autocars et de sièges européens la prennent en considération. En Amérique du Nord, des discussions avec certains manufacturiers de sièges et certains manufacturiers d'autobus fabriquant leurs propres sièges ont permis de constater que cette norme européenne sert souvent de référence.

Les normes australiennes (*Australian Design Rules* ou ADR) sont les plus sévères de l'industrie. En effet, contrairement aux normes européennes et nord-américaines, le port de la ceinture à trois points est déjà obligatoire depuis le début des années 1990.

Le tableau 2 présente une synthèse des ces trois normes.

TESTS ET VALIDATIONS

Tests servant à l'approbation des matériaux

Outre la norme NSVAC/FMVSS 302 exigée par le secteur automobile et l'industrie des autocars, l'APTA exige pour les trains de passagers trois tests supplémentaires (ASTM E 162, ASTM E 662 et ASTM E 1354) et Bombardier Transport en exige un quatrième (SMP-800-C) afin de pouvoir qualifier tout nouveau matériau.

Les résultats des tests effectués par la firme indépendante Bodycote en Ontario démontrent que les alliages de magnésium AM60 et AZ31 répondent à ces normes quant à l'inflammabilité des matériaux et l'émission de fumée toxique pouvant être émise lors d'une exposition à des chaleurs intenses.

Essai de corrosion

Dans le cas d'un siège, ce composant étant à l'intérieur du véhicule, il n'est pas exposé aux intempéries. Toutefois, la partie du siège en contact direct avec le sol (structure d'ancrage) peut être exposée à la neige, à l'eau, au sel et aux produits nettoyants. Le concept de siège présenté plus loin prévoit pour l'ancrage au sol l'utilisation d'une pièce en aluminium extrudée déjà couramment utilisée sur plusieurs concepts de siège européens et présentant de meilleures propriétés mécaniques.

Quant aux armatures du coussin et du dossier, il est possible de les concevoir de façon à éliminer le retient de tout liquide (liqueur, café, eau, etc.) déversé accidentellement sur le siège; ce qui prévient toute corrosion galvanique en présence d'autres matériaux. Il est important de préciser que le magnésium peut corroder très rapidement s'il est mis dans un milieu galvanique. C'est pourquoi on doit toujours isoler le magnésium à l'aide de matériaux neutres (tels que des polymères) afin qu'il ne devienne pas une électrode sacrificielle lorsque mis en contact direct avec de l'aluminium, de la fonte grise ou de l'acier dans un milieu aqueux.

Il est intéressant d'ajouter que les armatures de sièges en magnésium utilisés dans les automobiles ne sont pas soumises à un traitement de surface contre la corrosion puisque ces pièces ne sont pas en contact direct avec des éléments corrosifs.

Comparaison avec les tests de l'industrie automobile

Les sièges des voitures sont soumis à la norme NSVAC/FMVSS 207. En comparant cette norme à la norme CEE 80 ou même ADR 68, on remarque que le cahier de charge d'un nouveau siège passager en magnésium pour les autocars est moins sévère que celui pour un siège automobile.

Cette comparaison nous permet d'avancer que *la conception d'un siège passager pour les autocars est possible sachant qu'il existe déjà pour l'industrie de l'automobile des sièges fabriqués en magnésium soumis, lors de leur homologation, à des cas de chargements équivalents et/ou supérieurs à la norme la plus sévère dans le secteur des autocars.*

Les différents essais effectués sur les supports de planche de bord (armature de tableau de bord) en magnésium par l'industrie automobile, plus particulièrement ceux liés à l'absorption de l'énergie lorsqu'un occupant non attaché est projeté directement sur la pièce, permettent d'avancer qu'*il ne devrait pas y avoir de problèmes majeurs à concevoir un nouveau siège passager en magnésium pour les autocars capable de supporter et d'absorber l'énergie de l'occupant arrière projeté vers l'avant sur le dossier du siège.*

IDENTIFICATION DES TECHNOLOGIES DE FABRICATION

Le tableau 3 présente la liste des différentes technologies retenues pour l'étude de cas. Dans le cas du moulage permanent, une soumission pour des pièces en aluminium a aussi été demandée afin de pouvoir considérer, si nécessaire en raison des coûts, une solution hybride mariant magnésium et aluminium.

Tableau 3. Technologies évaluées pour la conception d'un siège léger

Procédé	Mg	Al	Nombre de fournisseurs contactés	Alliages suggérés
Procédés de moulage par gravité				
Moulage au sable	X		2	AZ91
Moulage permanent	X	X	3	AZ91, A413 et A356
Procédés de moulage sous pression				
Presse horizontale	X		1	AM60B et AJ62L
Presse verticale	X		1	
Thixomoulage	X		2	
Nombre de fournisseurs différents			7	

Note : Tous les fournisseurs contactés sont localisés en Amérique du Nord.

CONCEPT DE SIÈGE UTILISÉ POUR L'ÉTUDE DE CAS

Le concept utilisé pour l'analyse de cas est celui qui a été développé dans le cadre d'une étude de faisabilité réalisée pour Meridian visant à comparer les coûts de développement d'un siège en acier à celui d'un nouveau siège en magnésium. Ce concept de siège est illustré à la figure 1. La figure 2 illustre le concept en acier tel qu'utilisé typiquement par Prévost Car.

Le concept en magnésium est composé d'une pièce moulée unique pour la partie inférieure du siège, de deux dossiers, des accoudoirs et d'une pièce extrudée pour l'ancrage du siège au plancher de l'autocar. Le support coussin monocoque est la pièce maîtresse de ce concept comme il est celui sur lequel on assemble les dossiers, les accoudoirs, les pièces extrudées ainsi que les différents mécanismes d'ajustement de position du siège. Ce support coussin est fixé à l'autocar à deux endroits différents. Son extrémité située du côté de l'allée est fixée au support d'ancrage extrudé directement vissé au plancher tandis que son autre extrémité est vissée directement au mur intérieur de l'autocar en dessous des fenêtres.

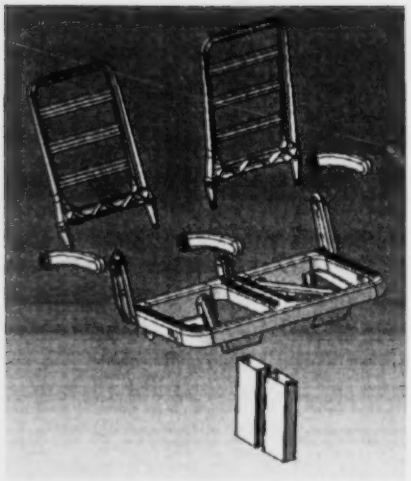


Figure 1. Concept de siège passager monocoque utilisé par Multina et Meridian Technologies (2002)

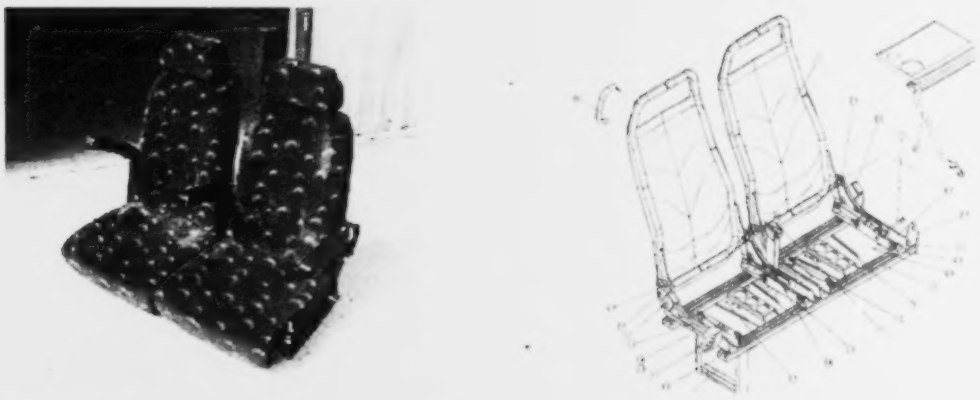


Figure 2. Siège en acier présentement utilisé par Prévost Car et ayant servi de référence pour l'analyse de cas

Des extrusions sont utilisées pour le support inférieur du siège parce que cette partie est soumise à des efforts très élevés lors d'une collision. Ainsi, afin de minimiser les risques de blessures aux passagers projetés vers l'avant lors d'une collision importante et les coûts additionnels reliés à un revêtement anti-corrosif, le concept proposé utilise des pièces extrudées en aluminium présentant de meilleures propriétés mécaniques que des pièces en magnésium moulées. Notre consultation des différents fabricants de sièges et d'autocars a permis de valider la pertinence de cette décision, tant au niveau technique qu'au niveau économique.

Les données de l'étude de faisabilité réalisée pour Meridian révèlent que ce concept en magnésium (deux places) engendre une réduction de poids de plus de 20 kg, soit une réduction allant jusqu'à 45 % par rapport à la solution complète (siège entièrement assemblé) en acier utilisée par Prévost Car.

Toutefois, puisque les analyses structurales n'ont pas encore été réalisées sur ce concept de siège et que le poids final variera selon la décision du fabricant de le concevoir avec ou sans ceinture de sécurité à trois points, une réduction de poids de 15 kg par siège double peut être considérée comme raisonnable. Ceci représente une réduction totale d'environ 375 kg pour un autocar de 50 passagers.

Description des réductions de coût liées à un siège en magnésium

En comparant les coûts d'une solution monocoque en magnésium à ceux d'une solution en acier, on constate plusieurs économies intéressantes notamment au niveau de l'assemblage et de la réduction des pièces rejetées. Ces économies, ont été estimées à 2,00 $ par siège double en magnésium (pour les volumes de vente cités au tableau 4 pour les huit premières années de production) par rapport à l'assemblage d'un siège équivalent en acier.

ÉTUDE DE CAS

Tableau 4. Hypothèse des volumes de ventes pour les huit premières années

Phase de développement et de commercialisation		Volume annuel estimé			
		Nombre d'autobus équipés des nouveaux sièges	Nombre de sièges doubles	Supports de coussin monocoque	Dossiers
Prototypes	An 0	1	**25**	x 1 unité	x 2 unités
Lancement commercial	An 1	10	**250**		
Production	An 2	20	**500**		
	An 3	40	**1 000**		
	An 4	60	**1 500**		
	An 5	100	**2 500**		
	An 6	150	**3 750**		
	An 7	200	**5 000**		
	An 8	300	**7 500**		

Le tableau 4 présente les hypothèses retenues pour les volumes annuels de sièges doubles utilisés pour l'estimation des coûts présentés dans l'étude de cas. Ces volumes tiennent compte d'une première phase de prototypage (pour un autobus), puis huit années de production de série.

Analyse des coûts des différentes technologies de moulage

Considérant que les procédés de moulage sous pression à injection verticale et de thixomoulage ne disposent pas des presses ayant des capacités suffisantes pour produire l'armature du coussin monocoque, chacun de ces procédés n'a été évalué que pour les armatures de dossiers et combiné avec l'utilisation du moulage sous pression conventionnel pour l'armature monocoque.

L'analyse des coûts d'outillage et des coûts de production pour chacune des technologies retenues nous permet de constater que :

- pour la réalisation des prototypes et la phase de validation, le moulage au sable est le procédé requérant le moins d'investissement;
- jusqu'à un volume cumulé d'environ 5 000 à 5 250 sièges doubles, le procédé de moulage permanent présente les meilleurs coûts et minimise l'investissement;
- sur la base du coût total cumulé (outillage et coût de production), la solution en magnésium par moulage permanent mobilise moins de capitaux qu'une solution en acier conventionnelle, jusqu'à un volume totalisant entre 8 000 et 9 000 unités (bien que l'amortissement de l'outillage de la solution en acier se fasse sur une durée de vie beaucoup plus longue, son coût d'acquisition est plus élevé que pour le moulage permanent);
- dès que les volumes totaux produits dépassent les 5 250 unités, l'option combinant le procédé de moulage sous pression conventionnel pour l'armature du coussin monocoque et le procédé de thixomoulage pour les armatures des dossiers présente les meilleurs coûts; toutefois, cette option nécessite deux fournisseurs plutôt qu'un seul;
- l'option utilisant le moulage sous pression à injection verticale offre un coût inférieur au moulage sous pression conventionnel et constitue la seconde meilleure option pour les grands volumes; sachant que des presses de plus grandes capacités seront bientôt disponibles sur le marché, il serait intéressant d'évaluer alors une solution complète utilisant cette technologie.

L'analyse des données obtenues permet de conclure que pour les six premières années de production (toujours selon les hypothèses de volumes du tableau 4), le procédé de moulage permanent est la meilleure option considérant l'incertitude sur les volumes. À partir de la septième année, si la demande continue sa croissance tel que prévue, une migration vers la solution combinant le moulage sous pression et le thixomoulage pourrait être envisagée afin de profiter de la compétitivité de ces procédés pour les volumes plus élevés. En fait, le volume prévu à compter de la sixième année (3 750 sièges doubles, soit quelque 150 autocars) est suffisant, s'il se maintient durant les années suivantes, pour justifier une migration vers les procédés de moulage sous pression.

La figure 3 illustre l'évolution du coût total cumulé selon ce scénario de migration au début de la septième année de production. On y constate l'augmentation importante des coûts lors de l'introduction des procédés de moulage sous pression et de thixomoulage en raison du coût élevé des outillages, mais les gains importants cumulés sur le coût des pièces font en sorte que le coût total cumulé revient rapidement inférieur à celui de la solution de référence en acier dès l'année suivante, et devient aussi nettement inférieur à la courbe du moulage permanent. En d'autres mots, les coûts supplémentaires engendrés par la migration de procédé lors de la septième année sont entièrement absorbés un an après le changement. Ce scénario semble donc être celui qui minimise les risques d'investissements tout en offrant le meilleur compromis sur le coût.

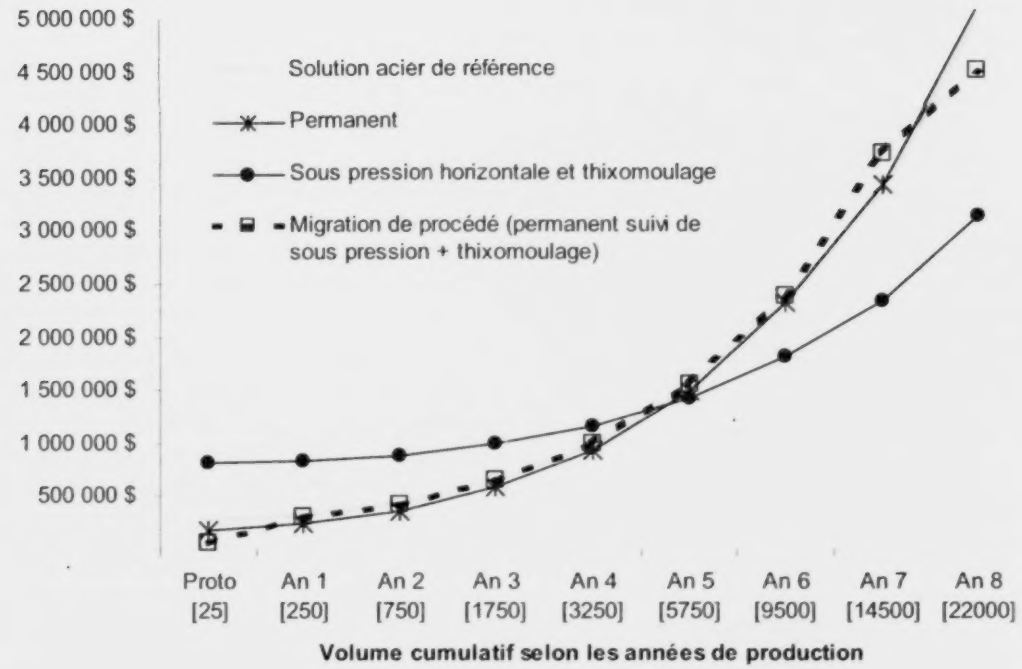


Figure 3. Évolution du coût cumulatif pour la production de sièges doubles (outillage et production) selon le scénario retenu

Comparaison des coûts avec la solution en acier

Sur la base des données précédentes, il est possible d'estimer un coût net unitaire pour un siège double en magnésium et de comparer ce coût avec la solution équivalente en acier tel qu'utilisée couramment par l'industrie.

En faisant certaines hypothèses, la figure 4 présente l'évolution du coût net unitaire pour un siège double complet avec le moulage permanent comme solution à long terme et le scénario de migration décrit précédemment, tous deux relativement au coût de la solution de référence en acier.

L'analyse de cette figure nous permet de constater que les sièges en magnésium par moulage permanent (comme solution à long terme) représente un coût supplémentaire de 10 % à 15 % par rapport à la solution en acier pour de faibles quantités (1 000 sièges doubles et moins ou 40 autocars et moins) et se maintient à 4 % de surcoût pour des volumes plus élevés (2 500 sièges doubles ou 100 autocars et plus par année). Sur la période de huit années, le coût unitaire moyen représente un surcoût d'environ 5 % par rapport au coût de la solution de référence en acier. En termes de coût par kilogramme épargné (métrique souvent utilisé dans les analyses de réduction de poids), cela représente un surcoût de 2,33 $/kg pour des volumes de 250 sièges par année, à un léger surcoût de 0,66 $/kg pour des volumes plus élevés.

Dans le cas du scénario où l'on privilégie une migration de procédé en cours de route, l'amortissement de l'outillage du moulage permanent se fait sur une plus petite quantité affectant ainsi le prix de revient. Au cours des six années de production avec ce

procédé, le coût total unitaire représente un surcoût variant d'environ 20 % à 10 %. Si on prend la moyenne du coût des pièces pour ces six années de production par moulage permanent, on obtient un surcoût d'environ 12 % par rapport à la solution en acier. Mais là où les choses deviennent plus intéressantes, c'est après l'introduction des procédés de moulage sous pression. En effet, l'option combinant le moulage sous pression et le thixomoulage permet d'obtenir une réduction de coût de près de 40 % par rapport à la solution en acier.

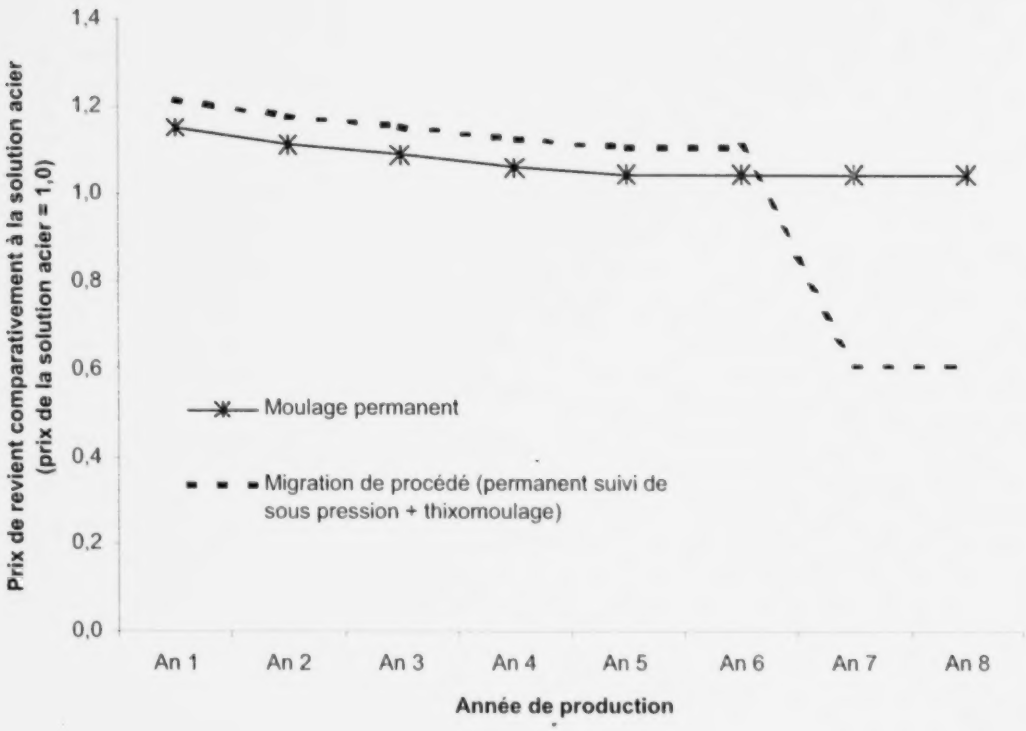


Figure 4. Évolution du coût net unitaire d'un siège double complet comparativement à la solution de référence en acier

Si on parle en termes de coût par kilogramme épargné dans ce scénario, cela représente un surcoût de 3,40 $/kg épargné par le moulage permanent pour des volumes annuels de 250 sièges doubles (10 autocars), à une économie de plus de 6,00 $/kg avec les procédés de moulage sous pression. À compter d'un volume de 2 500 unités par année (100 autocars), le surcoût devient inférieur à la limite de 1,75 $/kg épargné mentionnée par certains manufacturiers d'autocars.

Impact sur le coût du cycle de vie

Le tableau 5 présente une synthèse des impacts économiques suivant la réduction de poids des autocars due à des sièges en magnésium. Pour un opérateur, un autocar équipé de sièges en magnésium permet d'économiser directement quelque 6 000 $ durant la durée de vie du véhicule. Pour de grands opérateurs ayant des flottes de plusieurs centaines d'autocars, cela se transforme en plusieurs millions de dollars de profits supplémentaires.

Tableau 5. Impacts sur le coût du cycle de vie

Élément de coût du cycle de vie	Diminution du coût pour un allégement de 375 kg/autocar	
	Annuel/autocar	Durée de vie (15 ans) /autocar
Essence	295 $	4 425 $
Usure de freins et des pneus	110 $	1 650 $
Infrastructure routière	264 $	3 960 $
Émissions polluantes	176 $	2 640 $
Total	**845 $**	**12 675 $**

Au niveau de la réduction d'émission de CO_2, l'impact de la réduction de poids de 375 kg/autocar est relativement faible. On parle d'environ 1,14 tonne annuellement, soit quelque 17 tonnes par autocar pour sa durée de vie estimé à 15 ans. Néanmoins, cette réduction de poids peut s'inscrire en complémentarité d'autres solutions techniques d'allégement, contribuant aussi à la réduction des émissions de CO_2.

Coûts d'une solution hybride aluminium et magnésium

Pour la première phase de production, il est intéressant de comparer les coûts d'une solution exclusivement en magnésium par moulage permanent à une solution hybride mariant aluminium et magnésium. Les prix de la première solution hybride sont obtenus en calculant le coût d'une base monocoque en magnésium combinée à deux dossiers en aluminium tandis que la deuxième solution hybride est obtenue en combinant une base monocoque en aluminium à deux dossiers en magnésium.

Si on compare les coûts avec la solution de référence en acier, les deux solutions hybrides offrent une économie de coût, en plus d'offrir une économie de poids. Plus spécifiquement, pour la solution où la base monocoque est en aluminium, on obtient une économie par rapport à la solution en acier de l'ordre de 1 % à 5 % selon les volumes et la période d'amortissement des outillages. Pour la solution où les dossiers sont en aluminium, on obtient une économie variant entre 17 % et 24 %.

CONCLUSION

À la lumière des faits présentés précédemment, il apparaît qu'une solution de sièges plus légers est à la fois possible techniquement et viable économiquement.

Du côté technique, cette étude a permis de mettre en lumière que :

- au niveau de l'inflammabilité, le magnésium rencontre toutes les normes imposées par l'industrie automobile, celle des autobus et celle des trains;
- la capacité du magnésium d'absorber l'énergie lors de collision, si jumelée à une excellente conception du siège en fonction du procédé de moulage sélectionné pour la production, pourrait permettre dans certains cas d'améliorer la sécurité des occupants projetés sur le dossier du siège avant;

- la capacité du magnésium d'absorption des vibrations devrait permettre une réduction des vibrations transmises aux passagers et assurer ainsi un plus grand confort lors de longs voyages.

La décision finale quant au choix des matériaux (magnésium et/ou aluminium) peut varier selon les objectifs visés par le manufacturier de sièges, le manufacturier d'autocars ou encore l'acheteur final. Cependant, dans le choix de ces matériaux, il sera important de considérer que :

- le développement d'un siège en magnésium permet une réduction de poids d'environ 375 kg par autocar comparativement à moins de 200 kg pour un concept en aluminium;
- plus la réduction de poids sera importante, plus il sera facile pour les opérateurs d'augmenter la charge payante des autocars ou encore de respecter les normes des poids pour les différents essieux, de réduire la consommation de carburant et l'usure de composants tels les freins et les pneus;
- l'utilisation du magnésium permettrait la fabrication d'un siège ergonomique à paroi plus mince que ne le permettrait l'aluminium;
- la capacité d'absorption des vibrations du magnésium est un avantage non négligeable par rapport à l'aluminium.

Si les objectifs visés ne sont que purement économiques, la solution complètement en aluminium ou une solution hybride combinant aluminium et magnésium sont des choix avantageux, malgré les inconvénients par rapport à une solution entièrement en magnésium. Néanmoins, cette étude avait pour objectif de déterminer la viabilité économique et technique de la solution la plus légère, soit le siège en magnésium. Il a été constaté qu'à faible volume, une solution en magnésium par moulage permanent engendrerait un surcoût (de faible à important, selon le volume) et que pour demeurer compétitif à faible volume, voire pour réduire les coûts, une solution hybride doit être envisagée. Pour des volumes plus importants (3 750 sièges doubles et plus par année), une migration vers une solution entièrement en magnésium par moulage sous pression et thixomoulage offrait à la fois une réduction de poids optimale et une importante réduction de coût par rapport à la solution conventionnelle en acier.

L'engagement d'un seul manufacturier d'autocars à migrer vers une solution hybride magnésium-aluminium est suffisant pour obtenir dès le début des économies de coût par rapport à la solution conventionnelle en acier. Mais il est aussi important de souligner que l'industrie dans son ensemble aurait intérêt à favoriser une migration massive vers une solution entièrement en magnésium (moulage sous pression et thixomoulage), ce qui permettrait de gagner sur toute la ligne (coût, poids et confort).

RECOMMANDATIONS

Aspects commerciaux

En tenant compte des principaux faits exposés dans cette étude, les auteurs font les recommandations suivantes concernant le potentiel de commercialisation :

- Le développement d'un siège plus léger, soit en aluminium ou sous forme hybride combinant le magnésium et l'aluminium est économiquement

avantageux dès maintenant et devrait constituer le point de départ d'une nouvelle gamme de produits sur le marché en remplacement des sièges en acier.

- Pour favoriser l'atteinte rapide des volumes requis pour maximiser l'intérêt d'une solution entièrement en magnésium, la commercialisation devrait viser non pas uniquement le marché canado-américain, mais, dans le contexte de l'ALÉNA, inclure aussi le marché mexicain. Le développement de ce marché pourrait notamment se faire par le biais d'alliances stratégiques.

  Par ailleurs, sachant que le marché mexicain et les joueurs qui y sont présents sont aussi très près du marché brésilien, et que plusieurs constructeurs de ces deux pays sont d'origine européenne, la commercialisation d'un tel siège peut rapidement devenir internationale. Des groupes tels que Volvo Bus (Prévost Car au Canada et Volvo Bus au Mexique), DaimlerChrysler (Setra aux États-Unis et en Europe, Mercedes au Mexique), Irizar (Mexique, Amérique du Sud, Europe) peuvent être ciblés pour favoriser une adoption et une croissance rapide.

- Considérant le potentiel international d'un siège en magnésium et considérant les capacités mécaniques des alliages de magnésium, il serait avantageux de considérer une adaptation du siège selon les normes européennes en intégrant notamment une ceinture de sécurité à trois points.

- Connaissant l'intérêt de certains manufacturiers de trains à grande vitesse, il serait possible d'envisager une conception de sièges qui puisse aussi répondre aux besoins de cette industrie, ce qui permettrait d'accoître les volumes de production et d'ainsi réduire davantage le coût de revient.

Aspects techniques

La présente étude avait pour objectif de faire la lumière sur la faisabilité technico-économique d'un siège en magnésium. Maintenant, afin d'aller plus loin dans le développement et la commercialisation d'un tel siège, certains points techniques sont à approfondir. À ce titre, les auteurs font les recommandations suivantes :

- Peaufiner le concept de siège proposé dans l'étude de cas (et éventuellement l'adapter pour une approche hybride) et faire les analyses structurales qui s'imposent avec la norme européenne CEE 80 afin de valider la réduction de poids possible avec un siège passager en magnésium et/ou aluminium répondant à cette norme.

- Considérant les occasions de marchés, incorporer dans le nouveau concept les points d'attache d'une ceinture de sécurité à trois points.

- Poursuivre le développement du concept avancé en étroite collaboration avec des experts des technologies de moulage sélectionnées afin d'optimiser la conception du siège, de tirer profit au maximum des propriétés des alliages sélectionnés et de déterminer avec précision les économies de poids réalisables.

- Optimiser la conception afin de minimiser l'encombrement des différents composants du siège et améliorer l'ergonomie afin d'assurer un confort accru aux passagers sur de longues distances.

- Afin d'optimiser davantage le concept proposé, procéder à une analyse comparative et quantitative de l'alliage de magnésium AM60B typiquement utilisé par l'industrie automobile et des nouveaux alliages présentant des propriétés améliorées, notamment ceux de Noranda et Dead Sea Magnesium.
- Réaliser des essais de collision, de corrosion sur les pièces structurales exposées s'il y a lieu ainsi que tout autre essai mécanique permettant de valider le concept final.
- Réaliser une étude de cas réel avec des prototypes de sièges en magnésium ou hybrides assemblés sur un autocar mis en circulation.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION 1
   1.1 Objectif de l'étude 1
   1.2 Méthodologie 1
   1.3 Mise en contexte 2
   1.4 Quelques définitions 5

2. REVUE DU MARCHÉ, DES FABRICANTS ET DES APPLICATIONS ACTUELLES 7
   2.1 Marché nord-américain du transport en commun 7
      2.1.1 Vue d'ensemble du transport en commun nord-américain 7
      2.1.2 Autobus urbains 10
      2.1.3 Trains urbains 14
      2.1.4 Trains interurbains 16
      2.1.5 Autocars 17
   2.2 Évaluation du marché des sièges passagers 24
   2.3 Principaux fabricants de sièges pour le transport en commun 25
   2.4 Applications existantes de sièges en magnésium 27

3. ENJEUX TECHNOLOGIQUES ET ÉCONOMIQUES POUR UN SIÈGE EN MAGNÉSIUM 31
   3.1 Normes nord-américaines pour la conception de sièges 31
      3.1.1 Normes canadiennes et américaines 32
      3.1.2 Normes européennes 34
      3.1.3 Normes australiennes 35
      3.1.4 Comparatif des principales normes existantes 37
      3.1.5 Normes pour les sièges de trains voyageurs 38
   3.2 Tests et validations 39
      3.2.1 Tests servant à l'approbation des matériaux 39
      3.2.2 Tests typiques des fabricants de sièges 40
      3.2.3 Comparaison avec les tests de l'industrie automobile 42
   3.3 Propriétés des alliages de magnésium 43
      3.3.1 Introduction au magnésium 43
      3.3.2 Propriétés mécaniques des alliages de magnésium 45
      3.3.3 Applications dans le secteur du transport 47
      3.3.4 Technologies de mise en forme 52
   3.4 Enjeux économiques 54
   3.5 Accords commerciaux 55

4. ANALYSE COÛTS-AVANTAGES 57
4.1 Mise en contexte 57
4.2 Principaux avantages reliés à l'allégement 57
4.3 Identification des technologies de fabrication 61
4.4 Étude de cas 62
4.4.1 Sources des données utilisées 62
4.4.2 Coûts à considérer 63
4.4.3 Concept de siège utilisé pour l'étude de cas 63
4.4.4 Estimation de la réduction de poids 65
4.4.5 Description des réductions de coût liées à un siège en magnésium 65
4.4.6 Hypothèses des volumes de ventes 67
4.4.7 Analyse des coûts des différentes technologies 68
4.4.8 Comparaison des coûts avec la solution en acier 73
4.4.9 Impact sur le coût du cycle de vie 75
4.4.10 Coûts d'une solution hybride aluminium et magnésium 76

5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 79
5.1 Synthèse des faits 79
5.2 Conclusion 80
5.3 Recommandations 82

OUVRAGES DE RÉFÉRENCE 85

ANNEXE A – PERSONNES CONTACTÉES

ANNEXE B – RAPPORTS DE BODYCOTE

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Évolution du volume de passagers pour le transport urbain (autobus et trains) et le transport interurbain par rail 9

Figure 2. Évolution du volume de passagers pour le transport interurbain par autocar pour la période 1988-1997 9

Figure 3. Évolution des ventes annuelles d'autobus urbains aux États-Unis (unités vendues) 11

Figure 4. Évolution des ventes annuelles d'autobus urbains au Canada (unités vendues) 11

Figure 5. Autobus urbains fabriqués en 2002 pour le marché américain, par manufacturier (unités fabriquées) 13

Figure 6. Évolution des ventes annuelles de voitures voyageurs pour les trains urbains aux États-Unis (unités vendues) 14

Figure 7. Évolution des ventes annuelles de voitures voyageurs pour les trains urbains au Canada (unités vendues) 15

Figure 8. Trains urbains fabriqués en 2002 pour le marché américain, par manufacturier (unités fabriquées) 15

Figure 9. Évolution des ventes d'autocars aux États-Unis et au Canada pour la période 1989-2003 19

Figure 10. Composants en Mg de la colonne de direction (Daimler Chrysler) 48

Figure 11. Armature de volant en Mg (Alfa Romeo) 48

Figure 12. Support de planche de bord en Mg de la Mini de BMW 49

Figure 13. Support de planche de bord en Mg de la Ford Explorer 49

Figure 14. Structure de siège en Mg de l'Alfa Romeo 146 50

Figure 15. Support de radiateur en Mg de la Ford F-150 MRS 50

Figure 16. Support de pédalier en Mg de la Corvette de GM 50

Figure 17. Dossier d'un siège arrière (40 %) en Mg 51

Figure 18. Dossier d'un siège arrière (60 %) en Mg 51

Figure 19. Pilier B en Mg d'une voiture de rallye 51

Figure 20. Dossier de siège avant en Mg de Jaguar 51

Figure 21. Concept de siège passager monocoque utilisé par Multina et Meridian Technologies (2002) 64

Figure 22. Siège en acier présentement utilisé par Prévost Car et ayant servi de référence pour l'analyse de cas 64

Figure 23. Évolution du coût cumulatif pour la production de sièges doubles (outillage et production) selon le procédé de moulage retenu 71

Figure 24. Évolution du coût cumulatif pour la production de sièges doubles (outillage et production) selon le scénario retenu 71

Figure 25. Évolution du coût net unitaire d'un siège double complet comparativement à la solution de référence en acier 74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Aperçu du marché américain du transport en commun terrestre 8
Tableau 2. Aperçu du marché canadien du transport en commun terrestre 8
Tableau 3. Principaux manufacturiers d'autobus urbains pour le marché canado-américain (30 pi et +) 12
Tableau 4. Les 10 plus importants opérateurs de trains urbains sur le marché canado-américain 16
Tableau 5. Les 10 plus importants transporteurs par autocars sur le marché canado-américain 19
Tableau 6. Principaux manufacturiers d'autocars pour le marché nord-américain 20
Tableau 7. Modèles d'autocars les plus populaires en 2003 sur le marché canado-américain 22
Tableau 8. Estimation du marché nord-américain de nouveaux sièges pour le secteur du transport en commun terrestre (véhicules neufs) 24
Tableau 9. Aperçu des manufacturiers de sièges passagers pour le secteur des transports en commun terrestres 26
Tableau 10. Normes de conception canado-américaines (NSVAC/FMVSS) 32
Tableau 11. Aperçu de la norme APTA (États-Unis) 33
Tableau 12. Normes de conception européennes (CEE) 34
Tableau 13. Aperçu de la norme CEE 80 35
Tableau 14. Normes de conception australiennes (ADR) 36
Tableau 15. Aperçu de la norme ADR 68 36
Tableau 16. Comparatif des normes internationales pour les sièges passagers d'autocars 37
Tableau 17. Normes APTA SS-C&S 016-99 pour les trains de banlieue (États-Unis) ... 38
Tableau 18. Tests nord-américains requis pour la qualification des nouveaux matériaux 39
Tableau 19. Propriétés mécaniques des alliages de magnésium et autres matériaux .. 46
Tableau 20. Technologies évaluées pour la conception d'un siège léger 62
Tableau 21. Hypothèse des volumes de ventes pour les huit premières années 67
Tableau 22. Coût de développement de l'outillage pour chacun des procédés 69
Tableau 23. Coût de production des pièces selon le procédé de fabrication 70
Tableau 24. Impacts sur le coût du cycle de vie 75
Tableau 25. Comparaison des coûts d'une solution par moulage permanent entièrement en magnésium et de solutions hybrides utilisant l'aluminium. 77

GLOSSAIRE DES ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

ABA	American Bus Association
ACTU	Association canadienne du transport urbain
ADR	Australian Design Rules
Al	Aluminium
ALÉNA	Accord de libre-échange nord-américain
ANPACT	Association nationale de fabricants d'autobus, de camions et de semi-remorques du Mexique (abréviation en espagnol)
APTA	American Public Transportation Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
BRT	Bus Rapid Transit
CAFE	Corporate Average Fuel Economy Program
CDT	Centre de développement des transports
CEE	Commission économique européenne
EPA	Environmental Protection Agency (É.-U.)
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standards (É.-U.)
FTA	Federal Transportation Administration (É.-U.)
G	Accélération gravitationnelle g = 9,8 m/s^2 (nous utilisons une majuscule pour éviter toute confusion avec l'abréviation g utilisée pour le gramme)
Mg	Magnésium
NSVAC	Normes de sécurité des véhicules automobiles du Canada
SAE	Society of Automotive Engineers

1. INTRODUCTION

1.1 OBJECTIF DE L'ÉTUDE

La présente étude a été réalisée pour le Centre de développement des transports (CDT) de Transports Canada afin de lever certaines incertitudes face à l'utilisation du magnésium pour la fabrication de sièges plus légers pour le secteur du transport en commun et plus particulièrement pour le secteur des autocars. L'étude avait pour objectif de valider la faisabilité d'un siège en magnésium et de proposer un plan d'actions permettant le développement et la validation des premiers prototypes.

Bien que des solutions en aluminium soient aussi possibles et considérées dans cette étude, la solution en magnésium est celle qui présente le scénario optimal en termes de réduction de poids et c'est donc le scénario qui sera privilégié afin d'en déterminer la viabilité. Au terme de cette analyse, le lecteur comprendra qu'il y a toute une gamme d'options possibles misant soit sur une solution entièrement en aluminium, entièrement en magnésium ou une combinaison de ces matériaux. Le choix final reposera sur les objectifs particuliers des manufacturiers et les compromis souhaités en termes de réduction de poids, réduction de coûts, confort et sécurité.

Les marchés analysés sont ceux des autobus urbains, des autocars, des trains urbains (métros, trains légers et trains de banlieue) et des trains interurbains. Le marché des autocars a été retenu comme le premier marché pouvant bénéficier de sièges en magnésium étant donné la nature même des sièges (plus luxueux et prix plus élevé que dans le secteur du transport urbain) et l'ouverture des manufacturiers nord-américains à ce sujet (comparativement au secteur ferroviaire interurbain typiquement plus conservateur). L'analyse des enjeux et l'étude de cas portent donc sur ce premier marché cible. Néanmoins, l'étude souligne les similitudes entre le marché des autocars et celui des trains qui pourrait constituer un second marché. Une fois les économies d'échelles réalisées, le marché des autobus urbains pourrait certainement à son tour bénéficier de l'expertise développée dans le secteur des autocars.

Dans le contexte de l'Accord de libre-échange nord-américain (ALÉNA), les marchés canadien, américain et mexicain sont considérés (les données sur le marché mexicain sont toutefois plus limitées).

1.2 MÉTHODOLOGIE

IC^2 Technologies inc., une firme spécialisée dans la veille technologique et le développement de produits en métaux légers, a été mandatée pour réaliser la présente étude.

La réalisation de cette étude repose sur :

- deux analyses de cas réalisées par l'un des auteurs pour le développement d'un siège en magnésium pour les marchés des autocars et des trains;
- une revue de la littérature spécialisée et des normes gouvernementales;
- une revue des études précédentes réalisées pour Transports Canada et le CDT relativement à la réduction de poids des autobus et autocars;
- une collecte de données et de statistiques sur l'industrie;
- des interviews avec des représentants de l'industrie, particulièrement des transformateurs de magnésium, des manufacturiers d'autobus et d'autocars, des manufacturiers de sièges et des opérateurs de flottes d'autocars (interurbains et nolisés);
- la réalisation de tests complémentaires auprès d'organismes certifiés.

L'annexe A présente la liste des firmes et individus qui ont été consultés pour la réalisation de cette étude.

Le plan de travail a été organisé afin d'atteindre les objectifs suivants :

- présenter un portrait du marché du transport en commun afin d'identifier le marché nord-américain des sièges;
- présenter des utilisations actuelles de sièges en magnésium, notamment dans l'industrie automobile;
- identifier et décrire les principaux enjeux technologiques et économiques pour le développement d'un siège en magnésium;
- réaliser une étude coûts-avantages pour la fabrication d'un siège d'autocar en magnésium;
- proposer un plan d'actions pour le développement et la commercialisation de sièges en magnésium.

1.3 MISE EN CONTEXTE

La réduction du poids des véhicules présente plusieurs avantages reconnus et devient ainsi un enjeu majeur tant pour les considérations environnementales que pour la sécurité routière et l'émergence des énergies nouvelles :

- **réduction de la consommation de carburant** : chaque tranche de 10 % de réduction du poids d'un autocar interurbain entraîne une économie de 4 à 5 % de la consommation de carburant;
- **réduction des émissions polluantes** : une réduction de 1 kg entraîne, au cours de la durée de vie utile d'un autocar, une réduction de l'ordre de 45 kg de CO_2;
- **amélioration de la sécurité** : la réduction du poids facilite le freinage et lors de collisions, la force de l'impact sera moindre avec des véhicules plus légers;
- **énergie nouvelle** : la légèreté est un élément essentiel pour faciliter la viabilité des nouveaux systèmes à propulsion propre tels les piles à combustible;

- **durabilité des routes** : la relation entre le poids d'un essieu et le dommage subit par la chaussée est typiquement une relation d'ordre quatre, c'est-à-dire qu'un poids deux fois plus élevé entraîne typiquement 16 fois plus de dommage [1].

En contrepartie, diverses évolutions des véhicules engendrent des augmentations significatives de poids. Dans le secteur des autobus urbains, l'aménagement des véhicules pour le transport des personnes handicapées, l'utilisation de carburant alternatif tel que le gaz naturel, les systèmes de contrôle des émissions ne sont que quelques exemples de sources d'accroissement du poids. Du côté des autocars, l'augmentation de la longueur des véhicules et du nombre de passagers, l'amélioration du confort (confort des sièges, système vidéo, dispositif de réduction des vibrations et du bruit, etc.), l'amélioration de la sécurité et la réduction des émissions ne sont que quelques exemples de sources d'augmentation du poids.

Les travaux de recherche visant à réduire le poids des véhicules lourds sont en croissance, tant au Canada qu'aux États-Unis.

À titre d'exemple, en 1999, Transports Canada publiait une étude visant à examiner l'utilisation actuelle des matériaux composites dans la construction des autobus urbains et relever les meilleures façons d'utiliser ces matériaux dans l'allègement des autobus [2]. En 2000, Transports Canada initiait une étude visant à définir le problème de poids des autocars et à réaliser une étude technique de la structure des autocars et de leurs composantes afin d'identifier les avenues d'allégement [3]. Cette étude a mis en lumière l'importance croissante de la question du poids des autocars tel que l'illustre l'extrait suivant (tiré des pages xiii, xiv et xviii) :

> «*En 1988, un protocole d'entente (PE), élaboré sous l'égide de l'Association des transports du Canada, visait à instaurer une plus grande uniformité des règlements provinciaux relatifs aux poids et dimensions des véhicules. En vertu de ce PE, les limites de poids de l'essieu avant, de l'essieu moteur et de l'essieu traîné ont été établies à 5 500 kg, 9 100 kg et 6 000 kg respectivement. Mais des études ont révélé que sur un total de 140 autocars, 50 % dépassaient les 5 500 kg de limite de poids de l'essieu directeur. En 1997, la limite de poids de l'essieu avant a été portée à 7 250 kg. Encore là, des études ont montré que sur 200 autocars, 3 % dépassaient la nouvelle limite réglementaire touchant l'essieu avant, et 18 %, la limite de 9 100 kg pour l'essieu moteur. Le dépassement des limites de poids a donc été reconnu comme un problème récurrent. […]*
>
> *Autre facteur en faveur de l'allégement : la pollution engendrée par le secteur des transports, qui soulève de plus en plus d'inquiétudes. On estime en effet que chaque année, les autocars consomment 110,5 millions de litres de carburant pour parcourir quelque 375 millions de km. Même si les autocars contribuent peu au problème global des gaz à effet de serre, plus ils sont lourds, plus ils produisent des émissions polluantes. En signant le Protocole de Kyoto en 1997, le Canada s'est engagé à réduire de 6 %, par rapport aux niveaux de 1990, ses émissions de gaz à effet de serre, d'ici 2008 à 2012. L'allégement des autocars est un moyen de se rapprocher de cet objectif. […]*

> *Un allégement de 9 % entraînerait une diminution d'environ 7,7 millions de kg des émissions de CO_2 par année. Pour toute la durée de vie (15 ans) du parc canadien d'autocars, la réduction totale des émissions de CO_2 serait de 266 millions de kg.*»

Une deuxième phase de cette étude a été déposée au début de 2004 afin de réduire de 20 % la masse à vide d'un autocar de 45 pi, à la faveur d'une conception optimisée et de l'utilisation de matériaux avancés pour les structures du toit et du plancher et d'autres éléments.

Bien que le poids des sièges ne représente typiquement que 4 % du poids d'un autobus urbain ou d'un autocar, des économies non négligeables peuvent être obtenues relativement aisément et sans modification majeure du véhicule tel qu'illustré dans ce rapport qui s'inscrit dans la continuité de ces efforts.

Du côté américain, de nombreux efforts sont déployés afin de réduire le poids des autobus urbains. Selon le *U.S. Climate Change Technology Program* (un programme de R&D multi agences), les grands objectifs de R&D au cours des prochaines années dans le secteur des autobus urbains aux États-Unis consistent à :

- rencontrer ou dépasser les normes d'émission proposées par l'*Environmental Protection Agency* (EPA) pour les moteurs d'autobus d'ici 2007;
- disposer commercialement d'autobus urbains sans émission polluante ou presque d'ici 2015;
- accroître la charge brute embarquée (variant typiquement de 53 à 88 passagers) à 100 passagers avec une capacité de sièges augmentée de 43 à 50 pour un autobus à deux essieux, d'ici 2006;
- réduire la consommation de carburant à 10 miles/gallon (23,5 litres au 100 km) d'ici 2010;
- obtenir d'ici 2015 un autobus urbain à pile à combustible viable commercialement rencontrant toutes les normes habituelles au niveau de l'exploitation et de l'entretient à moins de deux fois le coût d'un véhicule conventionnel; avec un coût en capital marginal ne dépassant pas de 50 % celui des autobus conventionnels cinq ans après l'introduction commerciale.

Dans le même ordre d'idée, l'industrie américaine des véhicules lourds en collaboration avec diverses agences fédérales ont mis sur pied en avril 2000 le *21st Century Truck Program* visant à supporter le développement et la commercialisation de technologies viables permettant une réduction significative de la consommation d'essence et des émissions polluantes des camions et autobus [4]. Ce programme inclut un volet particulier pour les autobus urbains (typiquement ceux de 40 pi) dont l'objectif ultime consiste à tripler le kilométrage au litre de carburant d'ici 2010. Outre la réduction des diverses pertes d'énergies (moteur, friction mécanique, aérodynamisme, résistance du système roulant, etc.), une réduction de plus de 20 % du poids des véhicules est ciblée (poids cible d'un autobus urbain de 40 pi de 11 158 kg, comparativement à un poids actuel typique de 14 515 kg). Cette réduction de poids contribuerait à au moins 20 % des économies de carburant souhaitées.

1.4 QUELQUES DÉFINITIONS

Le secteur du transport en commun terrestre regroupe une variété de modes de transport visant le déplacement de plusieurs passagers sur une base locale, régionale ou interurbaine. Ces modes incluent deux grandes catégories de transport, soit le bus et le rail. Dans une très large mesure, nous retrouvons les modes décrits ci-dessous.

Autobus urbain : Autobus pour le transport de passagers en zone urbaine caractérisé par des parcours avec arrêts fréquents. En majorité des autobus de 30 pi et plus (typiquement de 40 pi, mais pouvant dépasser 60 pi pour les modèles articulés), disposant d'une trentaine de sièges ou plus (à dossier bas), pouvant aussi accueillir des passagers debouts. Doté de portes avants et arrières, sans compartiment bagage ni toilette. Opéré par une agence de transport public.

Trolleybus : Véhicule sur roue semblable à un autobus, mais doté d'un moteur électrique alimenté par un circuit de lignes électriques aériennes. Opéré par une agence de transport public.

Minibus : Véhicule généralement de 20 pi à 25 pi (15 à 20 sièges) typiquement utilisé pour les services de navette (aéroport, hôtel, service touristique, etc.). Généralement opéré par des intérêts privés. On en retrouve aussi pour certains services urbains dans de petites localités.

Autobus suburbain : Autobus intermédiaire entre le bus urbain conventionnel et l'autocar. Véhicule de 40 pi ou 45 pi où tous les passagers sont assis (sièges à dossier haut comparativement aux sièges à dossier bas des autobus urbains), avec une seule porte avant, sans compartiment bagage ni toilette, utilisé pour les déplacements entre la ville et les banlieues, avec relativement peu d'arrêts. Véhicule offrant un peu plus de confort que les autobus urbains, sans toutefois atteindre le niveau des autocars grand tourisme. Généralement opéré par une agence de transport public.

Autocar : Autobus relativement luxueux conçu pour le transport de passagers sur de longue distance. Bien que conçu pour des transports interurbains, les autocars sont aussi utilisés pour les services affrétés et les services touristiques. Véhicule caractérisé par un plancher élevé localisé au-dessus de compartiments à bagages. Ce sont des véhicules d'au moins 35 pi et pouvant accueillir plus de 30 passagers (typiquement de 40 pi ou 45 pi, doté de 45 à 58 sièges; sièges à dossier haut). Opéré par des intérêts privés.

Métro : Train électrique du type métro sous terrain, métro de surface ou train rapide, constitué de plusieurs voitures, utilisé en zone urbaine pour le déplacement d'un important volume de passagers. Opéré par une agence de transport public.

Train léger (ou métro léger) : Petit train urbain du type tramway ou trolley (typiquement une ou deux voitures), généralement à moteur électrique alimenté par un réseau de fils aériens. Opéré par une agence de transport public.

Train de banlieue : Ce type de train est conçu pour le déplacement de passagers entre une ville centrale et ses banlieues. Le train peut être à moteur diesel ou électrique. Opéré par une agence de transport public.

Train interurbain : Train plus luxueux, typiquement à moteur diesel, conçu pour le transport de passagers sur de longue distance. Opéré par les services ferroviaires voyageurs nationaux, VIA Rail au Canada et Amtrak aux États-Unis, ainsi que quelques opérateurs régionaux.

Note : Bien que d'un point de vue technique, les autobus urbains et suburbains soient de conception différente, les données statistiques disponibles ne font généralement pas la distinction entre les deux. Ainsi, dans les statistiques qui suivent, ces deux catégories sont combinées.

2. REVUE DU MARCHÉ, DES FABRICANTS ET DES APPLICATIONS ACTUELLES

Cette section vise à donner un aperçu du secteur du transport en commun terrestre, des principaux joueurs et de l'évolution des marchés. Une attention particulière est accordée au marché des autocars. Est aussi présenté un aperçu du marché des sièges passagers, ainsi qu'un portrait des principaux manufacturiers de sièges. Finalement, des applications existantes de sièges en magnésium sont brièvement décrites.

2.1 MARCHÉ NORD-AMÉRICAIN DU TRANSPORT EN COMMUN

2.1.1 Vue d'ensemble du transport en commun nord-américain

On compte pour le Canada et les États-Unis quelque 160 000 véhicules (autobus ou voitures de train de toute sorte) en service pour le transport urbain et interurbain de passagers et quelque 6 400 sociétés opérantes (agences publiques de transport ou entreprises privées). Le marché américain représente à lui seul 85 % des véhicules en service et 92 % des opérateurs. Les tableaux 1 et 2 donnent un aperçu de ces marchés.

Si l'on exclut le secteur du transport interurbain par autocar, les diverses options de transport en commun par train ou autobus ont connu globalement aux États-Unis et au Canada des croissances modérées au cours des récentes années (de 1997 à 2002), de l'ordre de 1,5 à 3,5 % par année en moyenne selon le mode de transport (voir la figure 1). Toutefois, pour certains segments de marché, les croissances moyennes ont dépassé les 10 % au cours des dernières années. À titre d'exemple, le nombre de voyageurs des trains de banlieue pour les villes de Montréal, Toronto et Vancouver est passé de 21 millions en 1994 à plus de 50 millions en 2002.

Du côté du transport par autocar, l'industrie a connu une certaine stabilité de l'achalandage au cours de la période de 1988 à 1997 aux États-Unis, alors qu'au Canada, on a observé une chute des embarquements de l'ordre de 40 % entre 1988 et 1993, pour ensuite observer un maintient de l'achalandage jusqu'en 1997 (voir figure 2). Depuis 1999, il semble que ce secteur vit une période relativement difficile, tant au Canada qu'aux États-Unis, avec une baisse significative de l'achalandage et des chiffres d'affaires, une réduction marquée des flottes des grands opérateurs et une réduction des nouvelles acquisitions. Néanmoins, le transport par autocars demeure un maillon majeur du transport de personnes en Amérique du Nord, surpassant le transport par avion et par train.

Tableau 1. Aperçu du marché américain du transport en commun terrestre

Mode	Nombre d'opérateurs	Nombre de véhicules ou voitures en fonction	Investissement annuel en immobilisation* (millions $US)
Transport urbain			
Autobus urbains	2 264	76 000	2 049
Métros	14	10 700	985
Trains légers	26	1 300	244
Trains de banlieue	21	5 100	484
Transport interurbain			
Autocars	3 600	40 000	N/D
Trains interurbains	1 **	2 140	200

* : Investissement direct pour l'acquisition des véhicules, la réhabilitation et l'acquisition de pièces majeures.

** : Amtrak est l'unique opérateur national représentant quelque 95 % du transport de voyageurs par rail aux États-Unis.

Sources : APTA (données de 2002), ABA et Amtrak

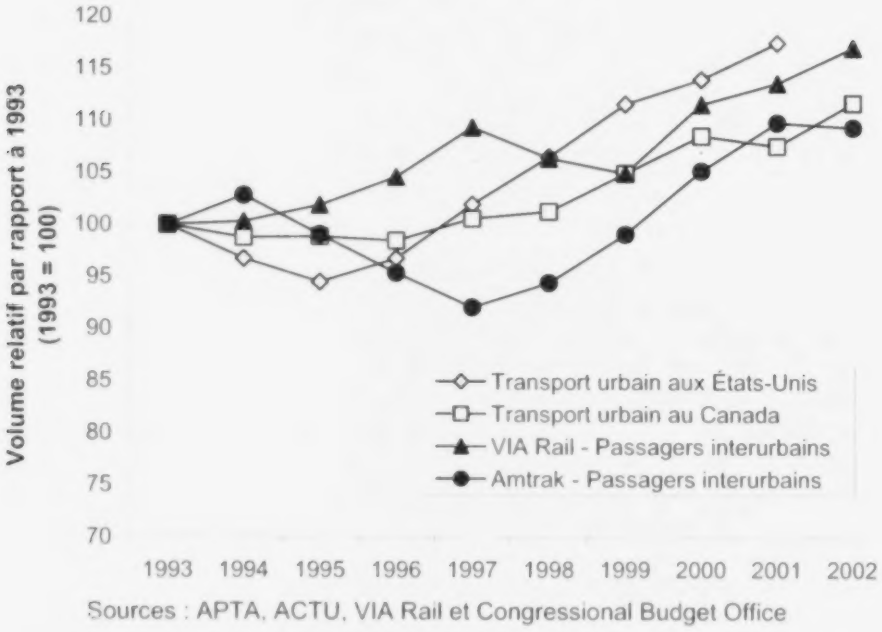
Tableau 2. Aperçu du marché canadien du transport en commun terrestre

Mode	Nombre d'opérateurs	Nombre de véhicules ou voitures en fonction	Investissement annuel en immobilisation* (millions $)
Transport urbain			
Autobus urbains	91	12 000	530
Métro		1 450	
Trains légers		600	
Trains de banlieue		580	
Transport interurbain			
Autocars	400	4 000	N/D
Trains interurbains	1 **	470	N/D

* : Investissement direct pour l'acquisition des véhicules, la réhabilitation et l'acquisition de pièces majeures.

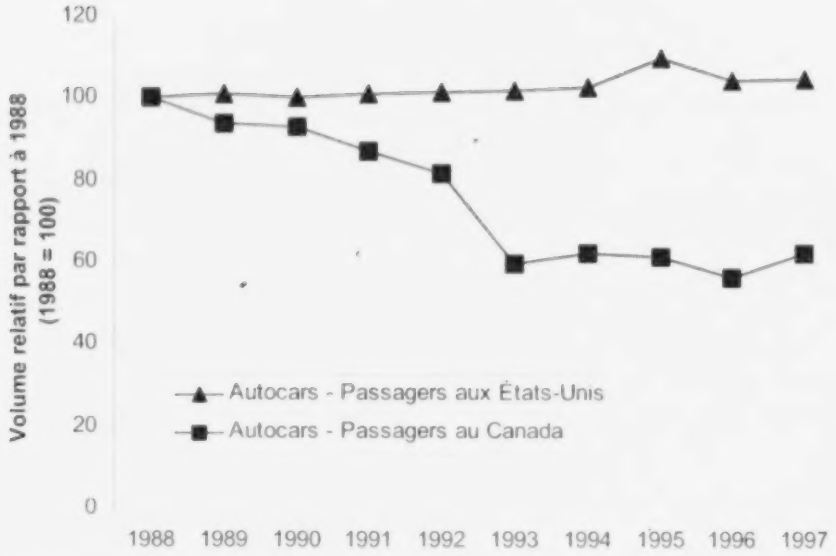
** : On compte un seul opérateur de classe I (VIA Rail) et quelques opérateurs régionaux de classe II représentant moins de 1 % des voyageurs transportés au Canada par rail.

Sources : ACTU (données de 2002), ABA et VIA Rail



Sources : APTA, ACTU, VIA Rail et Congressional Budget Office

Figure 1. Évolution du volume de passagers pour le transport urbain (autobus et trains) et le transport interurbain par rail pour la période 1993-2002



Source : Transports Canada, basée sur des données de Statistique Canada, Commission royale sur le transport des voyageurs au Canada, Eno Transportation Foundation inc.

Figure 2. Évolution du volume de passagers pour le transport interurbain par autocar pour la période 1988-1997

Par ailleurs, on observe une croissance significative des investissements gouvernementaux dans l'amélioration et le développement des infrastructures urbaines de transport en commun, particulièrement aux États-Unis. Le Congrès américain a approuvé en mai 1998 le *Transportation Equity Act for the 21st Century* (connu sous le sigle TEA 21) allouant 42 milliards $US jusqu'en 2003 pour le développement du transport public dans son ensemble. L'administration Bush travaille présentement sur un nouveau programme qui pourrait allouer quelque 69 milliards $US pour les six prochaines années.

On compte présentement 43 projets d'investissement de plus de 100 millions de dollars aux États-Unis et au Canada uniquement dans le secteur du train urbain (métros, trains légers et trains de banlieue), dont les 10 plus important totalisent près de 38 milliards de dollars américains. Le secteur du train interurbain n'est pas en reste non plus avec les projets d'investissement d'Amtrak de l'ordre de 1 milliard de dollars américains pour les cinq prochaines années et VIA Rail qui prévoit avoir investit un total d'un milliard de dollars au cours de la période 2000-2008.

2.1.2 Autobus urbains

Les principaux clients du marché des autobus urbains sont les agences et sociétés de transport public des différentes municipalités nord-américaines. On peut estimer qu'en 2002, la flotte canado-américaine d'autobus urbains était constituée d'environ 88 000 véhicules, soit quelque 76 000 aux États-Unis et quelque 12 000 au Canada. Du côté mexicain, la flotte d'autobus urbains serait d'environ 90 000 véhicules, mais en large partie constituée de minibus et de bus de moins de 30 pi.

Selon les données de l'APTA (voir figure 3), environ 4 800 nouveaux bus ont été acquis en 2002 sur le marché américain, réparti comme suit :

- 16 % dans la catégorie 29 sièges et moins;
- 40 % dans la catégorie 30-39 sièges;
- 44 % dans la catégorie 40 sièges et plus.

Les autobus articulés ou à double plancher (typiquement de 60 à 80 sièges) représentaient 4 % des nouvelles acquisitions.

La moyenne des acquisitions annuelles au cours des 10 dernières années aux États-Unis a été d'environ 4 600 unités. Selon les données de l'ACTU pour le Canada (voir figure 4), les acquisitions ont été d'environ 460 autobus en 2002, alors que la moyenne des dix dernières années a été d'environ 400 unités.

Pour le Mexique, selon des données de Volvo Buses de Mexico, le marché des bus urbains toutes catégories a été de 6 400 unités en 2003, pour une moyenne de 7 300 unités au cours des cinq dernières années. Toutefois, ce marché est caractérisé par un nombre important de bus de moins de 30 pi. On peut estimer à environ 40 % la part de marché actuel des nouveaux autobus urbains de plus de 30 pi, soit de l'ordre de 2 500 unités par années. Soulignons que cette part risque d'augmenter dans les prochaines années puisque le gouvernement mexicain souhaite remplacer une quantité importante des petits autobus actuellement utilisés dans les grandes villes par des autobus de plus grande taille et que la production de minibus sera interdite.

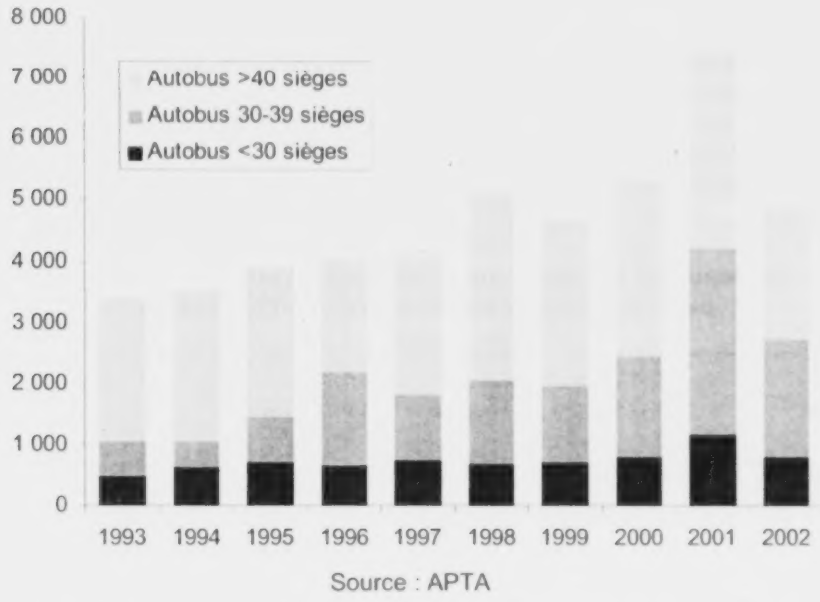


Figure 3. Évolution des ventes annuelles d'autobus urbains aux États-Unis (unités vendues)

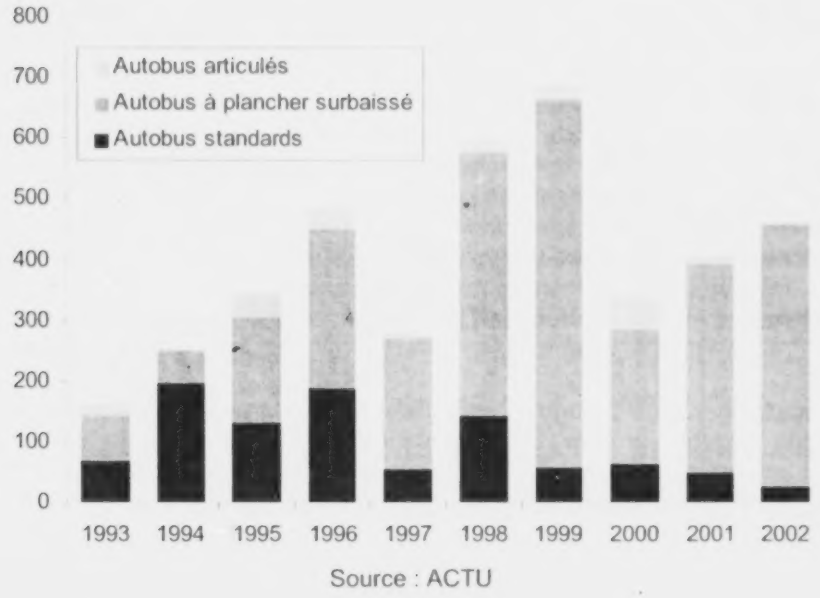
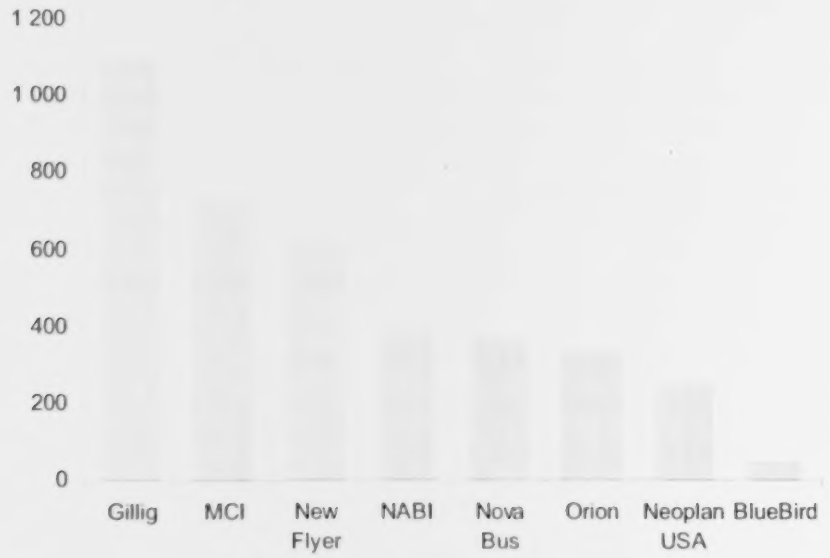


Figure 4. Évolution des ventes annuelles d'autobus urbains au Canada (unités vendues)

Le tableau 3 présente un aperçu des manufacturiers d'autobus urbains (de 30 pi et plus) pour le marché canado-américain. Nous retrouvons aussi la société Van Hool de Belgique qui exporte certains de ses véhicules sur les marchés canadiens et américains. Par ailleurs, Motor Coach Industries, leader du marché des autocars, fabrique aussi des autobus suburbains et interurbains adaptés aux besoins des agences métropolitaines de transport. La figure 5 présente un aperçu des véhicules construits en 2002, par manufacturier, pour le marché américain.

Tableau 3. Principaux manufacturiers d'autobus urbains pour le marché canado-américain (30 pi et +)

Manufacturier	Siège social	Usines	Produits	Est. unités vendues par année
New Flyer Industries www.newflyer.com	Manitoba	• Manitoba • Minnesota (2)	5 modèles à plancher bas, de 30' (25 sièges) à 60' articulé (64 sièges)	1 100
Nova Bus (Prévost Car) www.novabus.com	Québec	• Québec (2)	1 modèle de 40' à plancher bas (38 sièges)	450
Orion Bus Industries (DaimlerChrysler Commercial Buses North America) www.orionbus.com	Caroline du Nord	• Ontario • New York	10 modèles, à plancher bas et haut, de 29' à 40' (20 à 45 sièges)	700-900
NABI – North American Bus Industries www.nabiusa.com	Société-mère NABI Rt basée en Hongrie	• Alabama (2) • Hongrie	8 modèles, à plancher bas et haut, de 30' à 40' (26 à 65 sièges)	850
Gillig www.gillig.com	Californie	• Californie	6 modèles à plancher bas et haut, 29' à 40' (28 à 45 sièges)	1 200
Neoplan USA www.neoplanusa.com	Colorado	• Colorado	7 modèles à plancher bas et haut, de 35' à 60' articulés (37 à 65 sièges)	250-450
Blue Bird (Henlys Group) www.blue-bird.com	Georgie	• Georgie	6 modèles à plancher bas et haut, de 28' à 40' (27 à 49 sièges)	50-100



Source : APTA, basée sur des données partielles

Figure 5. Autobus urbains fabriqués en 2002 pour le marché américain, par manufacturier (unités fabriquées)

Développement des BRT

Il est intéressant de souligner l'émergence et l'intérêt croissant pour les BRT, acronyme anglais pour *Bus Rapid Transit*. Les BRT sont définis comme des services de transport en commun rapide, basé sur l'autobus, utilisant un droit de passage dédié et des stations comme pour les trains légers ou tramways. Aux États-Unis, la FTA définit les BRT comme étant un mode rapide de transport combinant les qualités du rail urbain et la flexibilité des autobus. Les systèmes BRT sont considérés comme une alternative moins coûteuse au développement du rail urbain, une alternative à la construction de nouvelles autoroutes et un catalyseur au développement urbain. Les BRT sont aussi perçus comme un moyen de redorer l'image du transport en commun, particulièrement en Amérique du Nord.

Les BRT sont principalement utilisés dans les grandes agglomérations urbaines typiquement de plus d'un million d'habitants avec une importante concentration d'emplois dans le centre ville. Les principales caractéristiques typiques des BRT inclus notamment des voies dédiées, des stations «attirantes», des véhicules distinctifs et faciles d'embarquement, un système de collection hors véhicule, l'utilisation de technologies de transport intelligent et des services fréquents toute la journée. Bien que d'autres facteurs soient considérés comme plus importants ou prioritaires, le confort des passagers figure aussi parmi les considérations généralement retenues dans la conception des nouveaux véhicules BRT. Toutefois, l'aspect coût et durée de vie sont les grandes préoccupations.

2.1.3 Trains urbains

Tout comme pour les autobus urbains, les principaux clients du marché des trains urbains (métros, trains légers du type tramway et trains de banlieue) sont les agences et sociétés de transport public des grandes agglomérations nord-américaines. On peut estimer qu'en 2002, la flotte canado-américaine de voitures de train des différentes catégories était constituée de près de 20 000 unités, soit quelque 17 000 aux États-Unis et quelque 2 600 au Canada.

Toujours selon l'APTA, environ 950 voitures passagers ont été construites en 2002 pour le marché américain, réparties comme suit :

- 21 % dans la catégorie des moins de 40 sièges;
- 46 % dans la catégorie des 40 à 49 sièges;
- 14 % dans la catégorie 50 à 74 sièges;
- 1,5 % dans la catégorie 75 à 99 sièges;
- 14 % dans la catégorie 100 à 129 sièges;
- et 3 % dans la catégorie des 130 sièges et plus.

Pour le Canada, les acquisitions n'ont été que de 21 voitures en 2002, tous dans la catégorie des trains légers. Au cours des cinq années précédentes, les volumes ont toutefois davantage avoisiné les 80 véhicules (voir figure 7), majoritairement dans la catégorie des voitures de métro.

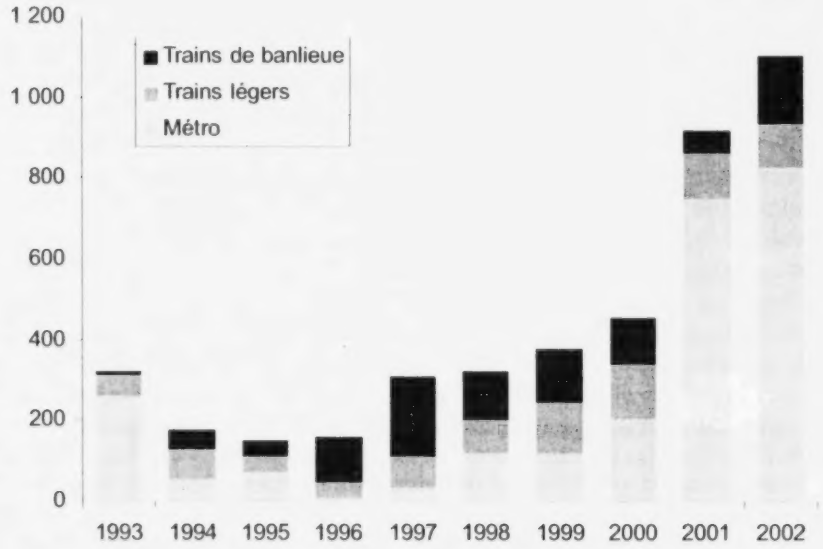


Figure 6. Évolution des ventes annuelles de voitures voyageurs pour les trains urbains aux États-Unis (unités vendues)

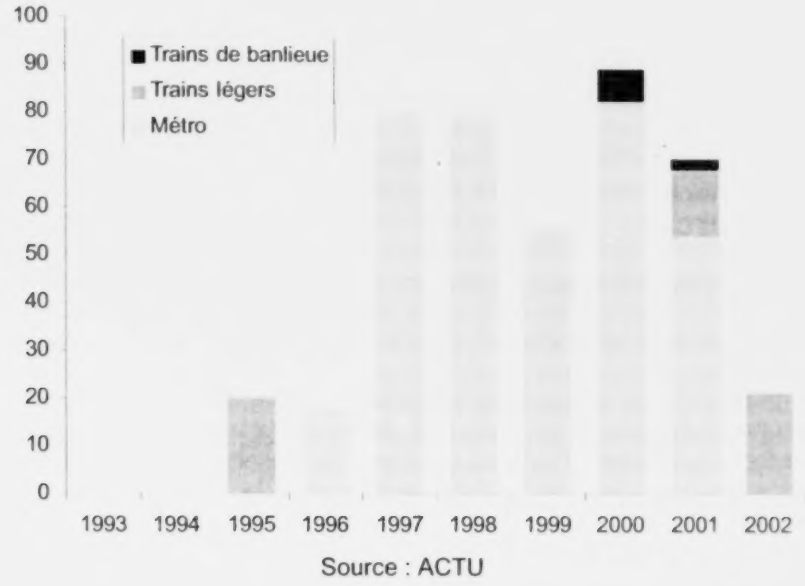


Figure 7. Évolution des ventes annuelles de voitures voyageurs pour les trains urbains au Canada (unités vendues)

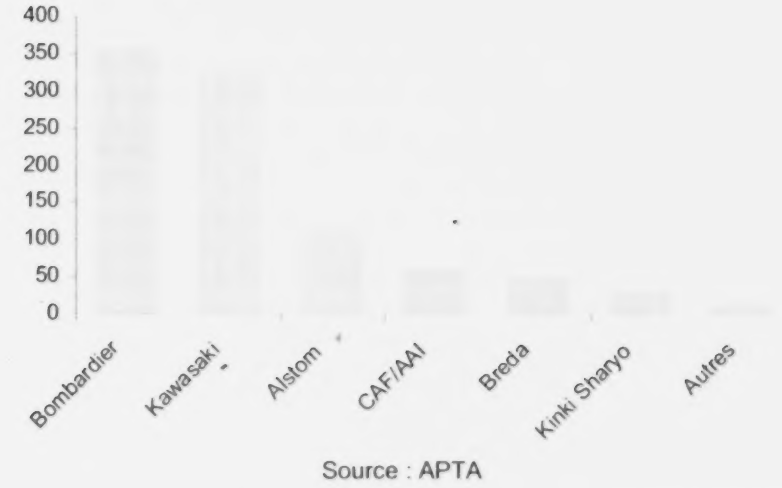


Figure 8. Trains urbains fabriqués en 2002 pour le marché américain, par manufacturier (unités fabriquées)

La figure 8 présente un aperçu des véhicules fabriqués en 2002 pour le marché américain, par manufacturier. Parmi les principaux constructeurs de voitures passagers pour les trains urbains nord-américains (fabricants de métros, trains légers et trains de banlieue), nous retrouvons :

- Alstom (New York, NY);
- Bombardier Transport (Saint-Bruno, QC);
- Siemens Transportation Systems (Sacramento, CA);
- Kawasaki Rail Car (Yonkers, NY);
- Breda Transportation (New York, NY);
- CAF USA (Washington, DC);
- Colorado Railcar Manufacturing (Ft. Lupton, CO);
- Nippon Sharyo USA (New York, NY).

Du côté des grands clients, l'agence métropolitaine de transport de la ville de New York représente à elle seule plus de 35 % de la flotte de trains urbains aux États-Unis. Si on inclut les agences Long Island Railroad et Metro-North Railroad, c'est près de 50 % de la flotte américaines dans cette région (voir tableau 4).

Selon le sondage annuel du magazine *METRO*, l'agence métropolitaine de transport de la ville de New York était encore une fois en 2003 en tête de liste des plus importants projets d'investissement pour le développement du rail urbain, avec un total de 9 milliards de dollars américains. Les seules villes canadiennes présentent dans le classement des 50 plus importants projets nord-américains sont Montréal en 37^{e} position (345 millions $) et Calgary en 42^{e} position (163 millions $).

Tableau 4. Les 10 plus importants opérateurs de trains urbains sur le marché canado-américain

Agence de transport	Nombre de véhicules
MTA New York City Transit	6 348
Chicago Transit Authority	1 218
Massachusetts Bay Transportation Authority	1 054
New Jersey Transit	1 037
MTA Long Island Railroad	976
MTA Metro-North Railroad (New York)	944
Metra Commuter Rail (Northeast Illinois)	910
Washington Metropolitan Area Transit Authority	892
Southeastern Pennsylvania Transportation Authority	869

Source : Magazine *METRO*, juin-juillet 2003

2.1.4 Trains interurbains

Le réseau des trains de voyageurs interurbains est géré en quasi-totalité (plus de 95 %) par les deux grandes sociétés nationales, soit VIA Rail au Canada et Amtrak aux États-Unis (le transport ferroviaire voyageurs au Mexique est presque inexistant). La flotte canado-américaine de voitures voyageurs totalisent quelque 2 610 unités, soit 2 140 pour Amtrak et 470 pour VIA Rail. Typiquement une voiture-coach peut accueillir entre 40 et 80 passagers

et parfois jusqu'à plus de 100 passagers (les voitures passagers incluent aussi les voitures-lits et les voitures de services).

Le transport ferroviaire voyageur interurbain fait l'objet d'importants investissements au Canada depuis 2000. En effet, Transports Canada a annoncé en octobre 2003 le renouvellement d'un programme de financement des immobilisations de VIA Rail. Le programme *Renaissance II*, doté d'un budget de 692,5 millions de dollars sur cinq ans est destiné à poursuivre la revitalisation des services ferroviaires voyageurs interurbains au Canada. Combiné avec la première phase du programme annoncé en avril 2000, dotée d'un budget de près de 402 millions $, c'est donc près d'un milliard de dollars qui auront été investis dans le matériel roulant et les infrastructures. Dans le cadre de son programme *Renaissance*, VIA Rail a procédé en 2000 à sa plus importante acquisition de véhicules au cours des 20 dernières années avec l'achat d'une centaine de voitures voyageurs (fabriquées par Alstom), augmentant sa flotte de près du tiers. De même, l'entreprise a aussi réalisé la rénovation intérieure de ses voitures de classe VIA 1 et de ses voitures LRC. Avec l'annonce du prolongement du programme d'investissement, VIA Rail poursuivra le renouvellement et la remise à neuf de son parc.

Du côté américain, selon le plan stratégique 2004-2008 d'Amtrak, la société souhaite entre autres minimiser ses investissements en termes d'acquisition de nouvelles voitures en misant davantage sur la rénovation des voitures actuelles pour en prolonger leur durée de vie et souhaite aussi accroître la standardisation de sa flotte. Ainsi, la société prévoit investir environ un milliard de dollars américains en immobilisation (acquisition et rénovation) pour sa flotte de voitures voyageurs au cours des cinq prochaines années. Selon les données de l'entreprise, elle prévoit acquérir quelque 90 voitures passagers et en rénover plus de 800 au cours de cette période.

Parmi les principaux constructeurs de voitures passagers fournisseurs de VIA Rail ou Amtrak, nous retrouvons :

- Alstom (New York, NY);
- Bombardier Transport (Saint-Bruno, QC);
- Siemens Transportation Systems (Sacramento, CA);
- Talgo Rail (Seattle, WA).

2.1.5 Autocars

Les autocars sont typiquement opérés par le secteur privé et constituent un volet important du système de transport nord-américain. À titre d'exemple, selon l'American Bus Association, les autocars (interurbains, nolisés et touristiques) ont transporté environ 774 millions de passagers en 1999 aux États-Unis, comparativement à 568 millions pour les compagnies aériennes et 377 millions pour les compagnies ferroviaires.

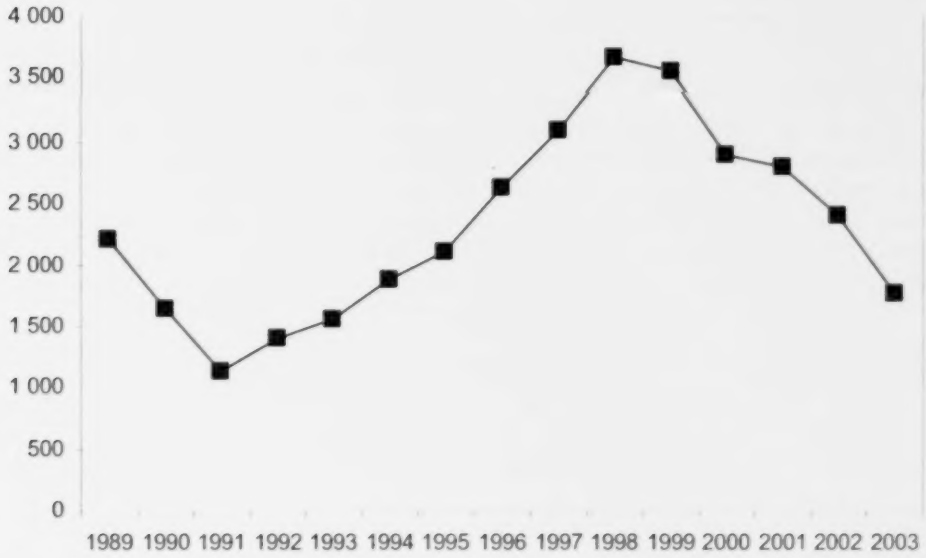
Selon une étude publiée en 2000 par R.L. Banks & Associates pour le compte de l'American Bus Association, on compterait quelque 40 000 autocars en circulation aux États-Unis et 4 000 au Canada, pour combler les déplacements de quelque 860 millions de passagers annuellement.

Le Mexique constitue aussi un important marché pour les autocars et une avenue intéressante d'expansion pour les manufacturiers canadiens et américains. Il y aurait entre 30 000 et 40 000 autocars en circulation pour les services interurbains dans ce pays. En fait, ce serait plus de 97 % du transport en commun interurbain au Mexique qui se ferait par autocars, le réseau ferroviaire passager étant pratiquement inexistant et le transport aérien très coûteux. Selon Volvo Bus de Mexico, environ 50 % des autocars mexicains sont de catégorie économique, 42 % serait de catégorie première classe et 8 % de catégorie exécutive.

Au niveau des opérateurs de flottes, on en compterait quelque 3 600 aux États-Unis et 400 au Canada, dont près de 90 % compteraient une flotte de moins de 25 véhicules et 75 % compteraient une flotte de moins de 10 véhicules. Les 50 plus importants opérateurs (en terme de véhicules en service) représenteraient environ 30 % du marché des autocars en Amérique du Nord (les deux plus importants en 2003 étant Coach USA et Greyhound Lines opérant un total d'environ 5 000 véhicules; soulignons toutefois que Coach USA subit présentement une importante restructuration incluant le démantèlement d'une partie de son réseau). Le tableau 5 présente un aperçu des 10 plus importants transporteurs par autocars en 2003. En termes de part de marché, Greyhound (propriété de Laidlaw International) est le plus important transporteur interurbain par autocar, tant au Canada qu'aux États-Unis.

Les ventes d'autocars aux États-Unis et au Canada auraient totalisé 2 400 unités en 2002 et 1 770 unités en 2003 (plus précisément 1 624 aux États-Unis et 147 au Canada), selon le *National Bus Trader Magazine* (les données proviennent d'une enquête auprès des manufacturiers). Tel que l'illustre la figure 9, après avoir connu une forte croissance dans les années 1990, le marché est en baisse constante depuis 1999 (une baisse cumulée d'environ 50 %). Selon le National Bus Trader Magazine, la moyenne typique des ventes d'autocars aux États-Unis et au Canada au cours des dernières décennies serait de 1 000 à 1 500 unités par année. Le boom des années 1990 (jusqu'à plus de 3 600 unités en 1998) s'expliquerait notamment par la forte économie et la migration vers les modèles de 45 pi. Par conséquent, les ventes de 2003 seraient, toujours selon le *National Bus Trader Magazine*, plus près de la normale et de la moyenne à long terme. Néanmoins, une autre étude, *The World Bus & Coach Manufacturing Industry* [5] semble plutôt considérer que les ventes annuelles devraient revenir à un niveau de 2 800 à 3 200 unités au cours de la période 2004-2007.

Pour le Mexique, les ventes d'autocars auraient totalisé environ 1 900 unités en 2003, soit la moyenne des cinq dernières années (Indicador Automototriz, février 2004 et Volvo Bus de Mexico). Le marché mexicain a connu une croissance importante entre 1999 et 2001, passant de 1 200 unités à 2 800 unités, pour revenir aux environs de 1 800 à 1 900 unités pour les années 2002 et 2003. Il est important de souligner ici que le marché mexicain est aussi important en taille que le marché canado-américain.



Source : *National Bus Trader Magazine*, mars 2004

Figure 9. Évolution des ventes d'autocars aux États-Unis et au Canada pour la période 1989-2003

Selon le plus récent sondage annuel du Magazine *METRO*, les opérateurs les plus actifs au cours de la dernière année en terme d'acquisition de véhicules ont été Peter Pan Bus Lines qui est passé de 135 autocars à 343 et Orléans Express qui est passé de 68 à 122 autocars (maintenant au 20^{e} rang des transporteurs).

Tableau 5. Les 10 plus importants transporteurs par autocars sur le marché canado-américain

Entreprise	Siège social	Nombre d'autocars
Coach USA	Houston, TX	2 727
Greyhound Lines	Dallas, TX	2 300
Academy Bus	Hoboken, NJ	704
Pacific Western Transportation	Toronto, ON	519
Liberty Lines	Yonkers, NY	411
Roberts Hawaii Tours	Honolulu, HI	394
Peter Pan Bus Lines	Springfield, MA	343
Holland America Line	Seattle, WA	314
Queens Surface	Flushing, NY	313
Martz Group	Wilkes Barre, PA	297

Source : Magazine *METRO*, janvier 2004

Les manufacturiers d'autocars

Le tableau 6 présente un aperçu des manufacturiers d'autocars actifs en Amérique du Nord. On compterait maintenant trois manufacturiers actifs au Canada et aux États-Unis (dont MCI et Prévost Car sont les plus importants), deux manufacturiers étrangers distribuant leurs produits sur le marché canado-américain et six manufacturiers actifs au Mexique. Soulignons que l'on retrouve aussi des manufacturiers européens tels que Mercedes-Benz, Scania, MAN et d'autres qui s'associent avec des manufacturiers de carrosserie locaux pour offrir leurs châssis sur le marché nord-américain et particulièrement mexicain (par exemple l'alliance Scania-Busscar).

Tableau 6. Principaux manufacturiers d'autocars pour le marché nord-américain

Manufacturier	Siège social	Usines	Produits	Est. unités vendues par année*
Autocars destinés au marché canado-américain				
Motor Coach Industries (MCI) www.mcicoach.com 1-866-624-2622	Illinois États-Unis	• Manitoba • Dakota du Nord	6 modèles : E/J/G/D4500 45' (56 sièges) D4000 40' (47 sièges) F3500 35' (36 sièges)	1 000-1 500
Prévost Car (Henlys Group et Volvo Bus) www.prevostcar.com (418) 883-3391	Québec Canada	• Québec (2)	3 modèles : Mirage XLII 45' (55 sièges) Série H 41' et 45' (48 et 58 sièges)	150-300
Blue Bird (Henlys Group) www.blue-bird.com 1-800-486-7122	Georgie États-Unis	• Georgie	1 modèle : Express 4500 45' (55 sièges)	<50
Autocars vendus en Amérique, mais fabriqués à l'étranger				
Van Hool www.vanhool.be +32 3 420 20 20 distribué par : ABC Bus Companies Minessota, É-U www.abc-bus.com 1-800-222-2871	Belgique	• Belgique	2 modèles : Série C2000 45' (57 sièges) Série T2100 45' (57 sièges)	150-300
Setra North America (DaimlerChrysler Commercial Buses North America) www.setra-coaches.com 1-800-882-8054	Caroline du Nord, États-Unis	• Allemagne	3 modèles : S215 40' (44-51 sièges) S217 45' (52-59 sièges) S417 45' (58 sièges)	50-100
Autocars destinés au marché mexicain				
Volvo Bus Corp. www.volvo.com/bus Mexique : +52 (55) 58 64 37 74	Suède	Volvo Bus de México • Mexique	3 modèles : Volvo 7350 11,6 m Volvo 9300 12,15 m Volvo 9700 12,9/13,7 m	600-800

Marcopolo S.A. www.marcopolo.com.br +55 (54) 209-4000 Mexique : +52 (81) 8130-2300	Brésil	• Brésil Polomex • Mexique	8 modèles : Série Paradiso 45' (42 à 56 sièges) Andare Class 43' (50 sièges) Allegro 43' (53 sièges) MP120 43' (54 sièges) Multego 41' (54 sièges) Viaggio 41' (49 sièges)	N/D
Busscar Onibus S.A www.busscar.com.br +55 (47) 441-1133 Mexique : +52 (44) 99 71 01 33	Brésil	• Mexique • Brésil		400-500
Irizar Group www.irizar.com +34 943 80 91 00 Mexique : +52 (442) 238 25 00	Espagne	Irizar México • Mexique	2 gammes de produits : Century InterCentury	400-600
Comil Onibus S.A. www.comilonibus.com.br +55 (54) 520-8700	Brésil	• Brésil • Mexique	5 modèles de la gamme Campione : 4.05/3.85/3.65/3.45/3.25	<250

* : Il est à noter que les ventes ont beaucoup fluctuées au cours des dernières années suite au ralentissement marqué du marché.

Canada – États-Unis

- **Motor Coach Industries (MCI)** a ses origines à Winnipeg (Manitoba) au début des années 1930. Après avoir été acquise par le fabricant mexicain d'autobus Grupo Dina en 1994, le contrôle fut cédé en 1999 à une firme d'investissement new-yorkaise. MCI a opéré une division mexicaine à Sahagun jusqu'au début de 2003. Elle concentre maintenant ses activités manufacturières dans son usine située à Winnipeg (Manitoba), alors que la seconde usine localisée à Pembina (Dakota du Nord) finalise l'assemblage et la finition des modèles de la série D. MCI demeure aujourd'hui le leader nord-américain des autocars, avec une part de marché de plus de 50 %. En juin 2003, MCI annonçait la livraison de son premier autocar hybride diesel-électrique à l'agence New Jersey Transit (versions modifiées des modèles D4000).
- **Prévost Car** est le deuxième plus important manufacturier d'autocars pour le marché canado-américain, après MCI. Depuis 1995, l'entreprise est propriété de Volvo Bus Corp. de Suède et de Henly's PLC du Royaume-Uni. Elle possède deux usines de fabrication et d'assemblage à Sainte-Claire (Québec), ainsi qu'une usine de découpage de pièces à Saint-Anselme (Québec).
- **Blue Bird** est surtout reconnue pour ses autobus scolaires où elle détient 40 % du marché nord-américain. L'entreprise a fait le lancement sur le marché américain de son unique modèle d'autocar, l'Express 4500, en février 2003. Pour Blue Bird, le secteur des autocars (majoritairement constitué aujourd'hui des carrosseries destinées aux véhicules récréatifs) ne représentent que 6 % de ses ventes. L'entreprise est propriété à 100 % de Henlys, aussi co-actionnaire de Prévost Car.

- **Van Hool** de Belgique est surtout active en Europe de l'Ouest ainsi qu'en Afrique du Nord. Elle fabrique environ 1 750 autobus et autocars par année. Grâce à une entente exclusive de distribution avec ABC Bus aux États-Unis (dont Van Hool détient une participation minoritaire), Van Hool est devenu le troisième fournisseur d'autocars en importance sur le marché canado-américain après MCI et Prévost. Les ventes de Van Hool sur le marché nord-américain auraient atteint des sommets de 600 autocars par année.
- **Setra North America** est une division du groupe DaimlerChrysler Commercial Buses of North America qui possède aussi Orion Bus Industries spécialisées dans les autobus urbains et Thomas Dennis Buses (aujourd'hui entièrement intégrée sous la marque DaimlerChrysler Commercial Buses). Setra North America est responsable de la vente et du service après-vente aux États-Unis et au Canada des véhicules Setra fabriqués en Allemagne. En Europe, Setra est membre de EvoBus, une filiale de DaimlerChrysler. Setra à introduit son plus récent modèle S417 en 2003, modèle ayant connu une excellente performance pour sa première année.
- **Neoplan USA** a déjà offert jusqu'à six modèles d'autocars pour le marché nord-américain. Mais suite à un changement de propriété, l'entreprise se concentre maintenant sur le marché des autobus urbains et s'est retirée en 2003 du marché des autocars.

Selon le sondage annuel du *National Bus Trader Magazine*, le tableau 7 présente les modèles les plus populaires en 2003 au Canada et aux États-Unis. Parmi les tendances observées sur le marché canado-américain, près de 94 % des modèles vendues sont maintenant des 43 pi ou 45 pi et avec l'introduction du S417 de Setra, tous les modèles sont maintenant dans la catégorie 102 pouces de largeur. La part de marché des modèles importés (Setra et Van Hool) ont été en croissance durant la période 1992-2000 pour atteindre un record de 22,5 %, pour ensuite chuter de façon significative en 2002 à 12,6 %. L'introduction du modèle S417 de Setra en 2003 a permis une remonté des modèles importés à 18,4 % du marché canado-américain.

Tableau 7. Modèles d'autocars les plus populaires en 2003 sur le marché canado-américain

	Marque et modèle
1.	MCI D4500
2.	MCI J4500
3.	Van Hool C2045
4.	Setra S417
5.	Prévost H3-45
6.	MCI G4500
7.	MCI E4500

Source : *National Bus Trader Magazine*, mars 2004

Mexique

- **Volvo Bus** a fait son apparition sur le marché mexicain en 1998 suite à l'acquisition de Mexicana de Autobuses connu sous le nom de MASA. Bien que la priorité consiste à satisfaire la demande du marché mexicain, les produits de l'entreprise

peuvent rencontrer les besoins de clients américains où Volvo Bus pourrait considérer une percée éventuelle dans des créneaux distincts de Prévost Car (*Bus Ride Magazine*, avril 2003). Le secteur autocar représenterait environ 23 % des ventes de Volvo Bus Mexico et l'entreprise aurait une part de marché d'environ 44 % au Mexique. Volvo Bus Corp. est le deuxième plus important fabricant d'autobus au monde.

- **Marcopolo** est le plus important manufacturier d'autocars au Brésil, avec une part de marché de l'ordre de 50 %. Ses autocars sont montés sur des châssis de Volvo, Mercedes-Benz, Scania ou Volkswagen. La fabrication d'autocars représente 37 % du chiffre d'affaires de l'entreprise, représentant environ 3 000 unités par année. Marcopolo a débuté ses exportations au Mexique en 1992 avec un partenariat avec la société Dina qui commercialisa le modèle Dina Viaggio. En 1994, suite à la fusion MCI-Dina, le modèle Dina Viaggio a été introduit aux États-Unis par MCI. Depuis 2000, Marcopolo a formé une alliance avec Mercedes-Benz Mexico qui détient 26 % de la filiale mexicaine Polomex SA de CV. Cette usine a une capacité de 5 000 véhicules par année (urbains et autocars) et cible les marchés d'Amérique du Nord, d'Amérique Centrale et des Caraïbes (produits commercialisés sous les marques Marcopolo et Mercedes-Benz).

- **Busscar** est le deuxième fabricant d'autobus et d'autocars au Brésil, avec de plus des usines au Mexique et au Venezuela et des co-entreprises en Colombie, à Cuba et en Norvège. L'entreprise produit quelque 5 500 carrosseries par année (autobus urbains et autocars), dont près de 30 % sont destinées à l'exportation (Amérique, Europe et Afrique). L'entreprise assemble ses autobus à partir de châssis de Scania, Volvo et Mercedes Benz. Le marché mexicain, où Busscar forme une alliance avec Scania, a représenté jusqu'à 20 % de son chiffre d'affaires (l'usine mexicaine vit présentement une restructuration et une baisse significative de sa production). Busscar souhaite maintenant pénétrer les marchés américain et canadien où elle forme depuis 2001 une alliance avec MCI pour le développement de modèles concepts (certains produits urbains ont été présentés en 2003).

- La filiale mexicaine d'**Irizar** établie en 1999 vise à obtenir une part de marché de l'ordre de 30 % au Mexique. L'usine mexicaine possède une capacité de production de 500 unités par année et planifie éventuellement une expansion à 1 000 unités. Ses carrosseries sont montées sur des châssis de Scania, Mercedes-Benz et MAN. La filiale mexicaine souhaite aussi tirer profit de l'ALÉNA et développer ses exportations vers les marchés américain et canadien. Rappelons qu'Irizar est le deuxième plus important manufacturier d'autocars en Europe et est présent dans 65 pays.

- **Comil** est un important fabricant d'autobus du Brésil et produit environ 600 autocars par année. L'entreprise est présente dans plusieurs marchés géographiques en Amérique Centrale, en Amérique du Sud, en Afrique, dans les Caraïbes ainsi qu'au Mexique. Les exportations (autobus urbains et autocars) représentent près de 40 % de ses ventes. La nouvelle usine mexicaine de Comil produit notamment la gamme d'autocars Campione à partir de carrosseries construites dans ses installations du Brésil qu'elle assemble avec des châssis fabriqués localement. Comil assemblait déjà ses carrosseries de modèles urbains et interurbains dans des installations de Volvo Bus de Mexico et de Scania.

2.2 ÉVALUATION DU MARCHÉ DES SIÈGES PASSAGERS

Note : Pour les fins des calculs qui suivent, nous considérons qu'un siège correspond à une place assise. Nous ne tenons pas compte du fait, pour l'instant, que techniquement les sièges sont généralement doubles ou même davantage dans le cas des autobus urbains.

Tableau 8. Estimation du marché nord-américain de nouveaux sièges pour le secteur du transport en commun terrestre (véhicules neufs)

	Autobus urbains	Autocars	Trains urbains	Trains interurbains
	Nombre de sièges typiques par véhicule			
	40	50	56	60
	Hypothèses sur le marché annuel des véhicules neufs			
Canada	400	150	80	N/D
États-Unis	4 600	1 350	630	N/D
Mexique	2 500	1 900	N/D	---
	Estimation du nombre de nouveaux sièges			
Canada	15 000	7 500	5 000	N/D
États-Unis	185 000	67 500	35 000	N/D
Mexique	100 000	95 000	N/D	---
Total	**300 000**	**170 000**	**40 000**	**N/D**
	Prix typique par siège double (siège d'origine)			
	400-500 $	700-2 000 $	Métro et trains légers : 450-900 $ Banlieues : 900-2 000 $	1 000-3 000 $

Comme l'illustre le tableau 8, la synthèse des données de la section précédente permet d'évaluer la taille du marché des sièges passagers pour les divers modes de transports en commun terrestre.

Pour le marché des autobus urbains, nous retenons les hypothèses de 4 600 nouveaux bus par année en moyenne pour le marché américain et 400 au Canada. Pour le Mexique, nous retenons l'hypothèse de 2 500 bus. Sur la base de la répartition des ventes typiques en 2002, on peut compter une moyenne de 40 sièges par autobus. Ainsi, nous pouvons estimer le marché annuel moyen aux États-Unis pour les nouveaux sièges d'autobus urbains à quelque 185 000 unités, environ 15 000 unités pour le Canada et 100 000 unités pour le Mexique.

Pour le marché des trains urbains (métros, trains légers et trains de banlieue), nous retenons les hypothèses suivantes : une moyenne de 56 sièges par voiture passager (basée sur les ventes de 2002), la moyenne conservatrice des nouvelles acquisitions au cours des cinq dernières années de 630 unités aux États-Unis et typiquement moins de 80 unités au Canada. Ainsi, nous pouvons estimer le marché annuel moyen aux États-Unis à quelque 35 000 unités (avec des niveaux dépassant les 50 000 unités au

cours des deux dernières années) et typiquement moins de 5 000 unités par année pour le marché canadien.

Du côté des autocars, nous retenons l'hypothèse d'une moyenne typique de 1 500 véhicules par année pour le marché canado-américain (90 % aux États-Unis et 10 % au Canada), d'une moyenne de 1 900 véhicules pour le Mexique et une moyenne de 50 sièges par véhicule. Ce marché est donc estimé à quelque 170 000 unités par année.

Nos estimations précédentes ne tiennent compte que du marché des véhicules neufs. Il est important de souligner aussi l'existence d'un marché de sièges pour la rénovation de véhicules (particulièrement dans le secteur ferroviaire).

Outre les volumes, il est aussi important de tenir compte de la nature et des prix de ventes des différents sièges selon le marché.

Les sièges d'autobus urbains, de métros et de trains légers sont typiquement des sièges économiques conçus à partir d'une coquille moulée en plastique renforcé de fibres de verre, avec des insertions coussinées et une armature d'acier. Ces sièges n'offrent aucune fonctionnalité et un confort minimal pour de courts trajets (sièges à dossiers bas). Le segment des autobus urbains, bien que représentant le plus fort volume, constitue le marché d'entrée de gamme où les prix de ventes sont plus faibles. Néanmoins, les prix demeurent assez élevé (environ 400 à 500 $ pour un siège double) en raison de la diversité des configurations de sièges dans un autobus et d'un véhicule à l'autre (siège simple, double, en rangée, siège au-dessus des roues, sièges arrière sur le compartiment moteur, etc.) et pour lesquels les économies d'échelle sont plus difficiles à obtenir.

À l'opposé, on retrouve les sièges d'autocars et de trains interurbains davantage conçus pour le confort des passagers sur de plus grandes distances. Ces sièges, plus complets et haut de gamme, sont rembourrés, offrent un dossier haut avec un appui-tête et des appuis-bras. La structure des sièges est typiquement en acier estampé. Dans certains cas, on retrouve des pièces d'armature en aluminium extrudé. Au niveau des prix, l'éventail est assez large, soit quelque 600 à 700 $ pour un siège double de catégorie économique, jusqu'à 2 000 $ et plus pour un siège double haut de gamme.

2.3 PRINCIPAUX FABRICANTS DE SIÈGES POUR LE TRANSPORT EN COMMUN

Le tableau 9 présente un aperçu des manufacturiers nord-américains de sièges passagers pour le secteur des autobus et des trains. Il faut aussi souligner qu'outre ces manufacturiers spécialisés dans les sièges, certains manufacturiers d'autobus fabriquent eux-mêmes leurs propres sièges (par exemple, Setra et Van Hool) ou encore ajoutent leurs propres gammes de sièges à ceux offerts par leurs fournisseurs (par exemple, Prévost Car et Busscar).

La sélection d'un siège est typiquement (dans plus de 80 % des cas) un choix effectué par le client. Dans la majorité des cas, le style serait le principal facteur de différentiation. En Amérique du Nord, les préoccupations relativement à la réduction de poids ne semblent pas encore avoir eu de répercussions remarquables dans les produits des principaux manufacturiers. Néanmoins, certains fabricants de sièges ont

souligné lors de l'enquête leur intérêt pour un siège plus léger, mais à prix concurrentiel. L'importance de la réduction de poids varie grandement d'un opérateur à l'autre, cela n'est donc pas toujours un argument de vente pour le fabricant de sièges, sauf si cela n'a pas d'impact négatif sur le prix. Rappelons que typiquement, un siège d'autocar pèse entre 35 et 40 kg. Plusieurs fabricants entrevoient l'aluminium comme un matériau offrant un potentiel intéressant pour la réduction de poids, mais très peu ont déjà considéré le magnésium.

Tableau 9. Aperçu des manufacturiers de sièges passagers pour le secteur des transports en commun terrestres

Entreprise	Principaux marchés dans le secteur des transports
Canada	
Multina 1275, rue Janelle Drummondville, QC, J2C 3E4 Tél. : (819) 478-8145 Téléc. : (819) 477-1071 www.multina.com	• Autocars • Trains urbains • Trains
Testori Americas P.O.Box 40 Summerside, P.E.I., C1N 4P6 Tél. : (902) 888-3200 Téléc. : (902) 436-4456 www.testori.pe.ca	Intérieurs clés en main pour : • Trains • Avions
États-Unis	
American Seating Company 401 American Seating Ctr. Grand Rapids, MI 49504-4455 Tél. : (616) 732-6600 Téléc. : (616) 732-6502 www.americanseating.com	• Autobus urbains • Autocars • Trains urbains
Freedman Seating 4545 West Augusta Blvd. Chicago, IL 60651 Tél. : 1-800-443-4540 Téléc. : (773) 252-7450 www.freedmanseating.com	• Autobus urbains et autocars • Autobus scolaires • Camions lourds • Véhicules spécialisés
National Seating Company 200 National Drive Vonore, TN 37885 Tél. : 1-800-222-7328 www.nationalseating.com	• Autocars

USSC Group 780 Third Avenue King of Prussia, PA 19406-1420 Tél. : (610) 265-3610 Téléc. : (610) 265-8327 www.usscgroup.com	• Autobus urbains • Autocars • Trains urbains
Mexique	
Amaya-Astron Seating Group Fulton No 6 Industrial San Nicolas 54030 Tlalnepantla, Edo de Mexico Tél. : (52) (55) 53-11-50-00 Téléc. : (52) (55) 53-10-82-60 www.amaya-astron.com.mx	• Autobus urbains • Autocars
Asientos Esteban México Calle C No 14 A Parque Industrial Puebla 2000 CP 72225 Puebla, PUE Mexico Tél. : (52) 222 282 83 20/21 Téléc. : (52) 222 282 83 14 www.esteban.com	• Autobus urbains • Autocars

Commentaires :

- Amaya-Astron Seating, basée dans la ville de Mexico, exporte ses sièges d'autobus et d'autocars sur les marchés américain, canadien et d'Amérique du Sud. L'entreprise bénéficie d'une entente de transfert technologique de la société espagnole Fainsa, un important manufacturier de sièges pour le marché européen. Elle bénéficie aussi d'une entente de commercialisation avec Freedman Seating aux États-Unis.
- Esteban est une société espagnole ayant des usines en Espagne, au Royaume-Uni, au Brésil et au Mexique. Les produits Esteban sont notamment distribués aux États-Unis et au Canada par Windsor Seating (Peachtree City, GA).
- On retrouve aussi d'autres joueurs se spécialisant davantage dans les sièges pour petits autobus, tel que C.E. White Company en Ohio.

2.4 APPLICATIONS EXISTANTES DE SIÈGES EN MAGNÉSIUM

L'utilisation du magnésium pour des structures de sièges a pris son envol vers 1997 où plusieurs applications au sein de l'industrie automobile ont fait leur apparition sur le marché. Nous présentons ci-après un bref aperçu des diverses applications qui ont vu le jour au cours des dernières années.

Automobiles

Les structures de sièges sont aujourd'hui une application courante du magnésium dans l'industrie automobile, au même titre que les structures de tableau de bord, les

armatures de volant et divers supports. Le procédé utilisé (sauf exception) est le moulage sous haute pression.

- GM a introduit une armature de sièges arrières constituée d'une pièce unique en magnésium dans ses modèles 1997 de sa plate-forme de fourgonnettes *U-body* (modèles Lumina APV, Pontiac Transport). GM a par la suite introduit les armatures de sièges en magnésium dans ses modèles 1999 des fourgonnettes Chevrolet Venture et Oldsmobile Silhouette. L'équipementier Delphi a aussi introduit des armatures de coussin en magnésium pour les sièges de la EV1 (véhicule électrique) de GM lancé en 1997 par la division Saturn. Ces armatures seraient maintenant utilisées dans les modèles Cavalier et Sunfire.
- En 1997, le groupe *Manufacturing Science and Technology* du CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*) en Australie annonçait la réalisation d'une armature de siège automobile en magnésium, l'une des plus légères au monde, résultant d'un partenariat avec Henderson's Automotive Group. Le dossier de siège est constitué d'une seule pièce en magnésium remplaçant un assemblage de 13 pièces d'acier, pour une réduction de poids de plus de 50 %, avec une capacité de charge doublée et un prix équivalent au design traditionnel.
- Alpha Romeo a utilisé pour son modèle 156 introduit en 1997 des armatures deux-pièces en magnésium pour ses sièges avants, obtenant ainsi une réduction de poids de 4 kg par siège.
- En 1998, Mercedes a introduit dans son modèle SL Roadster une armature de siège en magnésium suffisamment résistante pour intégrer à même le siège l'ancrage supérieur de la ceinture de sécurité. Le siège est constitué de cinq pièces magnésium totalisant 8,5 kg et utilisant les alliages AM50 et AM20. Mercedes a par la suite introduit en 1999 le magnésium pour les sièges de sa série S.
- En 1999, Araco, société affiliée au groupe Toyota, à Nagoya au Japon, annonçait le début de la production d'armatures de sièges en magnésium par le procédé de thixomoulage.
- Plus récemment, Renault a introduit des armatures de sièges en magnésium dans ses fourgonnettes Espace 2003.
- Finnveden (Suède) annonçait en décembre 2003 l'obtention d'un contrat de cinq ans du manufacturier de sièges Grupo Antolin (Espagne) pour la fabrication par moulage sous pression d'accoudoirs de sièges en magnésium.
- Du côté de Ford, les armatures des sièges baquets de la Mustang Cobra sont en magnésium et la toute nouvelle Jaguar XJ 2004 utilise aussi des pièces moulées en magnésium pour ses armatures de sièges.

Camions lourds

- Le fabricant de sièges conducteurs Sears Seating (États-Unis) utilise une armature en magnésium offrant un support orthopédique pour ses sièges Atlas à suspension à air pour les camions lourds de classes 7 et 8.

Trains

- Le fabricant de sièges Compin (Belgique) s'est investi dans le développement de solutions magnésium pour ses sièges de grandes lignes depuis 1991. L'entreprise utilise le magnésium notamment pour ses sièges de TGV. Pour le TGV Coréen, les armatures et les accoudoirs de sièges sont en magnésium. Pour le TGV Duplex en France, les coques des sièges, les accoudoirs et les tablettes des sièges sont en magnésium. Dans ce cas, l'utilisation du magnésium a permis de réduire le poids de 26 kg à 14 kg comparativement à l'utilisation de l'aluminium. Cette démarche vers le magnésium répondait à des souhaits de clients et grands constructeurs afin de diminuer la masse des véhicules (particulièrement dans le cas des voitures à deux niveaux).

3. ENJEUX TECHNOLOGIQUES ET ÉCONOMIQUES POUR UN SIÈGE EN MAGNÉSIUM

Cette section vise à comprendre les grands enjeux technologiques et économiques pouvant influencer le choix de nouveaux matériaux par les principaux joueurs de la fabrication de sièges d'autobus urbains et interurbains.

3.1 NORMES NORD-AMÉRICAINES POUR LA CONCEPTION DE SIÈGES

Nous constatons qu'il n'existe pas de normes spécifiques en Amérique du Nord pour la conception de sièges passagers dédiés aux autocars.

Une étude récente réalisée pour Transports Canada et portant sur la protection des occupants [6] trace un portrait des différentes normes canadiennes et internationales liées à la protection des passagers et analyse les causes d'accidents graves impliquant des autocars. Cette étude réalisée par Rona Kinetics & Associates (RKA) nous apprend que lors de la conception et la validation de nouveaux sièges passagers dédiés aux autocars :

- les normes australiennes sont les plus sévères de l'industrie, suivi des normes européennes;
- exception faite des autobus scolaires où il existe une norme spécifique pour les sièges passagers (NSVAC/FMVSS 222), les autres normes existantes canadiennes et américaines concernent principalement les sièges conducteurs ou ceux munis de ceinture de sécurité.

Cette étude représente un bon point de départ pour celle-ci puisqu'on y présente :

- les statistiques d'accidents d'autocars ayant causé des blessures graves et/ou des décès en Amérique du Nord, en Europe, en Australie et au Royaume-Uni;
- les principales normes de conception des autocars en Amérique du Nord, en Europe, en Australie et au Royaume Uni;
- les différentes options retenues par ces différents pays afin d'améliorer la protection des passagers.

Dans ce qui suit, nous nous référons donc aux principales normes de l'industrie énumérées dans cette étude ainsi qu'aux autres normes utilisées par les fabricants d'autocars et de sièges passagers interviewés. L'objectif consistera notamment à bien comprendre les principales différences entre les normes de sécurité pour les sièges passagers d'autocars ainsi que ceux des trains voyageurs afin de pouvoir ensuite les comparer aux normes prescrites par l'industrie automobile où des sièges en magnésium sont déjà commercialisés en nombre important depuis quelques années.

3.1.1 Normes canadiennes et américaines

Tous les autocars construits au Canada ou importés doivent satisfaire aux Normes de sécurité des véhicules automobiles du Canada (NSVAC) ainsi qu'aux *Federal Motor Vehicle Safety Standards* (FMVSS) des États-Unis. Pour les éléments qui nous concerne, les normes canadiennes et américaines sont exactement les mêmes.

On compte dix-huit normes traitant de la protection des occupants et du conducteur lors de collisions. Seulement cinq de celles-ci touchent directement aux sièges, c'est-à-dire les normes 207, 208, 209, 210 et 222 (voir tableau 10). En les étudiant de plus près, on note que quatre de ces normes ne sont valides que pour les sièges conducteurs et/ou les sièges où le port de la ceinture est obligatoire, tandis que la norme 222 vise la protection des passagers des autobus scolaires. Comme les réglementations canadiennes et américaines actuelles n'imposent pas le port de la ceinture de sécurité pour les sièges passagers des autocars, les normes 209 et 210 ne s'appliquent pas pour l'instant.

Tableau 10. Normes de conception canado-américaines (NSVAC/FMVSS)

Norme NSVAC/FMVSS	Description	Siège conducteur	Siège passager
207	Ancrage des sièges	oui	non
208	Système d'attache des passagers lors d'un impact frontal	oui	non
209	Mécanisme des ceintures de sécurité	oui	N/A
210	Ancrage des ceintures de sécurité	oui	N/A
222	Sièges pour autobus scolaire et protection lors des collisions	non	oui

Bien que l'imposition du port de la ceinture dans les autocars soit un sujet faisant la manchette dès qu'il y a un accident avec des blessés graves ou des décès, il est important de préciser qu'en Amérique du Nord, les experts de Transports Canada ainsi que ceux de l'industrie ne prévoient pas de changement à la législation obligeant le port de la ceinture avant une dizaine d'année ou plus.

À ce sujet, une consultation nationale a été organisée par Transports Canada dans les principales villes canadiennes entre les mois de juin 1999 et juin 2000 [7]. Dirigée par Price Waterhouse Coopers, cette commission a rencontré les gens de l'industrie afin de discuter des principales préoccupations concernant la sécurité des autocars et de la possibilité d'installer des ceintures de sécurité.

Les conclusions de cette commission ont plutôt mis en lumière un problème de perception du public. En effet, les statistiques de l'industrie du transport par autocars démontrent qu'il s'agit d'un des modes de transport les plus sécuritaires. Par ailleurs, la commission a mis en évidence d'autres aspects de la sécurité des passagers davantage prioritaires. Elle souligne entre autres l'importance d'une meilleure formation des chauffeurs, l'harmonisation des différentes normes d'une province et d'un territoire à un

autre et le respect des inspections périodiques sur les autocars par les opérateurs de flotte.

Néanmoins, du côté des constructeurs d'autocars et des fabricants de sièges passagers, on étudie déjà les contraintes qu'imposerait une loi obligeant la ceinture de sécurité ainsi que les coûts associés à un tel ajout.

Normes de l'American Public Transportation Association (États-Unis)

Des discussions avec des fabricants de sièges américains ont permis de confirmer que certains se réfèrent aux normes de l'APTA (*Standard Bus Procurement Guidelines*). Bien que ces normes soient principalement destinées aux concepteurs de sièges passagers des autobus urbains, elles peuvent aussi servir de référence à la fabrication des sièges pour autocars.

Ces normes traitent principalement :

- des dimensions des sièges et de l'espacement entre ceux-ci;
- du positionnement et de l'orientation des sièges dans les différents types d'autobus;
- des normes de conception à suivre et de la résistance des sièges;
- de la finition et des matériaux utilisés.

Tableau 11. Aperçu de la norme APTA (États-Unis)

Cas de charge	Conditions expérimentales	Zone d'application	Déformation maximale (mm)
Décélération	10 G Durée : 10 ms	Tout le siège	< 355 (partie supérieure du dossier) < 51 (coussin du siège lorsqu'un occupant de taille 95e percentile mâle frappe le dossier)
Force verticale	2,23 kN	Coussin	6,5
Force horizontale	2,23 kN	Dossier (force répartie également sur le dossier)	6,5
Force horizontale	2 sacs de 20 kg Cycles : 80 000 (répartie également vers l'avant et l'arrière)	Dossier du siège sur lequel est projeté un sac de sable de 20 kg vers l'avant et vers l'arrière attaché à une corde de 900 mm à une distance de 150, 200, 250 et 300 mm	
Force verticale	1 sac de 20 kg Cycles : 4 000	Coussin du siège sur lequel est projeté un sac de sable à une distance de 150, 200, 250 et 300 mm	
Force verticale	0,67 kN Cycles : 100 000	Un poids de 70 kg ayant la forme d'un fessier humain est lancé d'une hauteur de 90 mm	

Le tableau 11 présente les principaux cas de charge décrit dans la section couvrant la conception et la résistance d'un siège passager. Les experts de l'APTA ont élaboré ces différents cas de charges en fonction de la décélération maximale d'un autobus lors d'une collision évaluée à 10 G. Une valeur semblable aux normes européennes, mais largement inférieure à la norme australienne qui suppose une décélération de plus de 20 G.

En étudiant cette norme, on remarque que des cas de charges dérivés de l'utilisation normale d'un siège sont aussi inclus afin d'aider les fabricants à minimiser l'usure prématurée des différents matériaux utilisés lors de l'assemblage du siège.

Sachant qu'il n'y a pas une norme nord-américaine unique à laquelle font référence tous les fabricants de sièges d'autocars, il est intéressant d'étudier les autres normes déjà existantes en Europe et en Australie afin de pouvoir les comparer.

3.1.2 Normes européennes

La Commission économique européenne (CEE) est l'organisme responsable de légiférer et d'homologuer les sièges de véhicules de grandes dimensions pour le transport de voyageurs en Europe. Il y a actuellement trois normes qui s'appliquent à la conception de sièges pour les passagers, présentées au tableau 12.

Tableau 12. Normes de conception européennes (CEE)

Norme CEE	Description	Révision et/ou amendement
14	Spécification de la force d'ancrage des ceintures de sécurité de sièges passagers	2003
16	Ceinture de sécurité et système de retenu pour les occupants des véhicules à moteur	2003
80	Spécification relative à l'homologation des sièges de véhicules de grandes dimensions pour le transport des voyageurs en ce qui concerne la résistance des sièges et de leurs ancrages	2001

Comme les normes 14 et 16 s'adressent aux sièges munis d'une ceinture de sécurité, celle qui nous intéresse plus particulièrement au niveau des cas de charge est la norme CEE 80 décrite au tableau 13.

En Europe, malgré que cette norme ne soit pas encore obligatoire, les fabricants d'autocars et de sièges passagers la prennent en considération. En Amérique du Nord, des discussions avec certains manufacturiers de sièges et certains manufacturiers d'autobus fabriquant leurs propres sièges ont permis de constater que cette norme européenne sert souvent de référence.

Tableau 13. Aperçu de la norme CEE 80

Cas de charge	Conditions expérimentales	Zone d'application	Déformation maximale [1] (mm)
Décélération	10 G Durée : 10 ms	Tout le siège	
Force horizontale	1,0 kN Durée : 200 ms	Dossier (force répartie également sur la largeur du dossier à une hauteur pré-déterminée située entre 70 cm et 80 cm du sol)	400
Force horizontale	2,0 kN Durée : 200 ms	Dossier (force répartie également sur la largeur du dossier à une hauteur pré-déterminée située entre 45 cm et 55 cm du sol)	
Force verticale	5,0 kN [2]	Ancrage	

Note 1 : Ce document fait aussi référence aux valeurs des déformations maximales aux points d'application de la force qui doivent être égales au moins à 100 mm pour la force de 1 KN et de 50 mm pour la force de 2 KN assurant ainsi une certaine flexibilité du dossier et l'amortissement du passager projeté vers l'avant.

Note 2 : Cette force est multipliée par le nombre de places assises que l'ancrage supporte (typiquement deux).

Il est intéressant de noter que l'Union européenne stipule que des ceintures de sécurité doivent être installées sur tous les sièges où il n'y a pas de passagers devant. L'installation de ceintures à deux points d'attache est aussi obligatoire sur tous les autocars de plus de cinq tonnes. Pour les autocars entre 3,5 et 5 tonnes, les manufacturiers ont le choix entre des ceintures à deux ou trois points d'attache.

On note aussi que certains pays tels que le Royaume-Uni impose l'installation de ceintures à deux ou trois points sur les autocars de plus de 3,5 tonnes depuis le 1er octobre 2001. Tel que le mentionne RKA dans son rapport [6], ce n'est pas tous les pays européens qui respectent la directive émise recommandant l'installation et l'utilisation des ceintures de sécurité dans les autocars. Une situation sur laquelle se penche actuellement la commission européenne afin de rendre obligatoire à la grandeur de l'Europe cette directive émise au début des années 1990.

3.1.3 Normes australiennes

Les normes australiennes (*Australian Design Rules* ou ADR) sont les plus sévères de l'industrie. En effet, contrairement aux normes européennes et nord-américaines, le port de la ceinture à trois points est déjà obligatoire depuis le début des années 1990.

Il y a quatre normes de conception décrivant les différentes spécifications que doivent respecter les fabricants de siège (voir tableau 14), mais elles s'adressent principalement aux autobus plus petits et transportant moins de passager que les autocars. La norme ADR 68 est celle à laquelle les constructeurs de sièges d'autocars doivent se conformer et le tableau 15 présente ses principaux cas de chargement appliqués soit sur le coussin, le dossier, le siège au complet ou sur l'ancrage.

Tableau 14. Normes de conception australiennes (ADR)

Norme ADR	Description	Type de véhicule et/ou applicabilité
3	**Siège et ancrage** : Spécification des différents composants, de l'assemblage et de l'installation de sièges passagers	Tous les sièges d'autobus de 3,5 tonnes et moins
4	**Ceinture de sécurité** : Spécification du mécanisme de retenu des passagers et du conducteur afin d'éviter les éjections hors du véhicule et minimiser les risques de blessures graves lors d'une collision	Tous les sièges d'autobus
5	**Ancrage pour les ceintures de sécurité et système de retenu des enfants** : Spécification pour les ancrages des ceintures de sécurité et système de retenu des enfants afin d'assurer la sécurité et le confort des passagers	Siège conducteur des autobus respectant déjà la norme ADR 68
66	**Résistance des sièges, ancrages et rembourrage des accessoires** : Spécification sur la résistance, les ancrages, les ceintures de sécurité et le type de rembourrage adéquat des sièges et des accessoires afin d'assurer la protection des passagers.	Sièges de tous les autobus. Ne s'applique pas si le siège respecte la norme ADR 68.
68	**Protection des occupants** : Spécification sur la résistance, les ancrages et les ceintures et rembourrage des sièges et ses accessoires afin d'assurer la protection des passagers.	Sièges de tous les autobus jusqu'à 5 tonnes et ceux excédant 5 tonnes après le 1er juillet 1994.

Tableau 15. Aperçu de la norme ADR 68

Cas de charge	Conditions expérimentales	Zone d'application	Déformation maximale (mm)
Décélération	20 G Durée : 10 ms	Tout le siège	
Moment	530 N·m	Partie supérieur du dossier du siège	
Force verticale	8,9 kN	Ancrage du siège simulant une accélération de 20 G	
Force horizontale	17,7 kN		
Force horizontale	1,0 kN Durée : 200 ms	Dossier (force dirigée vers l'avant et répartie également sur la largeur du siège à une hauteur de 70-80 cm du sol)	150
	2,0 kN Durée : 200 ms	Dossier (force répartie également sur la largeur du siège à une hauteur de 45-55 cm du sol)	150

3.1.4 Comparatif des principales normes existantes

Le tableau 16 présente une synthèse des trois normes décrites aux tableaux 11, 13 et 15. En comparant ces normes, on remarque que les principales différences se retrouvent au niveau des forces appliquées sur l'ancrage et au niveau des charges dynamiques. La norme australienne est clairement la plus stricte et la norme européenne l'est davantage que la norme américaine.

Tableau 16. Comparatif des normes internationales pour les sièges passagers d'autocars

Type de chargement		Description des cas de chargements	Norme		
			APTA (É.-U.)	CEE 80 (Europe)	ADR 68 (Australie)
	Siège	Force horizontale (appliquée simultanément) – position H1 sur le dossier – position H2 sur le dossier – répartie également sur le dossier	2,23 kN	1,0 kN @ 70-80 cm 2,0 kN @ 45-55 cm	1,0 kN @ 70-80 cm 2,0 kN @ 45-55 cm
		Force verticale - Coussin	2,23 kN	(Voir force sur l'ancrage)	
		Moment sur la partie supérieure du dossier	N/D	N/D	530 N·m
	Ancrage	Force appliquée sur l'ancrage (siège double)	2,25 kN x 2 = 4,5 kN	10 kN	[8,9 kN (coussin) + 17,7 kN (dossier)] x 2 = 53,2 kN
Dynamique	Siège et ancrage	Décélération moyenne (G = 9,81 m/s^2)	10 G	6,5-8,5 G	20 G
		Vitesse minimale du chariot lors de la simulation d'impact	N/D	30-32 km/h	49 km/h
		Vitesse du pendule simulant le choc à la tête	N/D	N/D	6,69 m/s
		Critère d'acceptabilité			
		- tête	≤ 400	< 500	< 1 000
		- thorax	N/D	< 30 G	< 590 m/s^2 (60 G)
		- fémur	4,45 kN	< 10 kN et la valeur de 8 kN ne doit pas être dépassée pour plus de 3 ms	< 10 kN

Note : Au niveau de la force verticale sur le coussin présentée dans la norme APTA, on doit multiplier cette force par deux afin de pouvoir la comparer à la force sur l'ancrage spécifiée dans la norme européenne. On multiplie aussi par deux les forces spécifiées dans la norme australienne typiquement dénommées «*body blocks*» qui représentent en réalité deux masses positionnées sur le siège afin de simuler le poids d'une personne d'environ 135 kg subissant une décélération de 20 G.

On note que la norme australienne est la seule qui impose un moment à appliquer sur la partie supérieure du dossier. Ce cas de charge est semblable à celui imposé sur les sièges automobiles par les FMVSS et NSVAC aux États-Unis et au Canada. De plus, la décélération imposée par la norme australienne lors de la phase de calcul et des tests de validation est au moins le double de celle imposée par la norme de l'APTA et celle européenne.

Finalement, mentionnons que l'étude de RKA [6] souligne qu'il existe plusieurs démarches visant à harmoniser les normes européennes aux normes nord-américaines. En effet, depuis 1998, un comité international est instauré et travaille à l'harmonisation des différentes normes de sécurité des véhicules. Parallèlement à ces démarches, d'autres pays comme l'Australie travaille à harmoniser ses normes avec celles de l'Europe (un travail qui a été complété au cours de l'année 2003 par le Département des transports et des services régionaux et qui serait sur le point de publier certaines recommandations visant à harmoniser ses normes tout en s'assurant que la protection des passagers ne serait dans aucun cas réduite dans l'exercice).

3.1.5 Normes pour les sièges de trains voyageurs

En étudiant les différents sièges offerts par les principaux fabricants nord-américains et européens, on constate que la majorité de ces entreprises offrent des sièges adaptés autant aux besoins des opérateurs d'autocars qu'à ceux du secteur ferroviaire.

Des discussions avec des fabricants de sièges desservant ces deux industries confirment la possibilité de développer un siège plus léger en magnésium qui pourrait éventuellement desservir ces deux industries. Néanmoins, il a été souligné que l'approche conservatrice de l'industrie ferroviaire en ce qui a trait à l'adoption de nouveau matériau incite à débuter d'abord avec le secteur des autocars et à considérer le secteur ferroviaire une fois que la première expérience sera concluante.

Il est donc pertinent dans ce contexte d'étudier la norme pour les sièges passagers de trains et de la positionner par rapport aux autres normes existantes pour les autocars.

Tableau 17. Normes APTA SS-C&S 016-99 pour les trains de banlieue (États-Unis)

Cas de charge	Conditions expérimentales	Zone d'application
Décélération	8 G Durée : 250 ms	Tout le siège
Force horizontale	1,35 kN Durée : 5 s	Sur la partie supérieure du dossier et répartie également sur sa largeur
Force verticale	2,0 kN Durée : 5 s	Sur le coussin, au point centrale du bord avant où s'appuient les cuisses
Force latérale	Décélération : 4 G Durée : 200 ms	Application au centre de gravité du siège d'une force horizontale équivalente à 4 fois le poids du siège et de ses composants
Force verticale	Décélération : 4 G	Application au centre de gravité du siège d'une force verticale équivalente à 4 fois le poids du siège et de ses composants

Le tableau 17 démontre que les cas de chargements statiques et dynamiques pour les trains de banlieue sont soit équivalents ou inférieurs à ceux des sièges pour les autocars (selon les normes APTA *Passenger Rail Equipment Safety Standards*).

3.2 TESTS ET VALIDATIONS

3.2.1 Tests servant à l'approbation des matériaux

La consultation des constructeurs nord-américains d'autocars confirme que chaque nouveau matériau doit satisfaire la norme NSVAC/FMVSS 302 au niveau de l'inflammabilité. Soit la même norme qu'utilise l'industrie automobile afin de qualifier les nouveaux matériaux.

Sachant qu'un siège en magnésium développé pour l'industrie des autocars pourrait éventuellement être commercialisé pour desservir l'industrie ferroviaire, les tests supplémentaires exigés par cette industrie ont été identifiés et ont été réalisés par un organisme certifié.

Outre la norme NSVAC/FMVSS 302 exigée par le secteur automobile et l'industrie des autocars, l'APTA exige pour les trains de passagers trois tests supplémentaires et Bombardier Transport en exige un quatrième afin de pouvoir qualifier tout nouveau matériau. Une description de ces différents tests ainsi que les résultats obtenus sont présentés au tableau 18.

Tableau 18. Tests nord-américains requis pour la qualification des nouveaux matériaux

Norme	Description	Alliage testé	Laboratoire	Épaisseur	Résultat
NSVAC et FMVSS 302	Mesure du taux de combustion d'un matériel lorsque exposé à une flamme vive pendant 15 secondes	AM60B	Noranda (2002)	2 et 3,8 mm	Aucune combustion
ASTM E 162 (NFPA 258)	Inflammabilité des matériaux avec source de chaleur rayonnante	AZ31	Bodycote	2,3 mm	Aucune combustion
ASTM E 662	Densité de la fumée (avec flamme et sans flamme)	AM60B	Bodycote	4,3 mm	Rencontre la norme de la *Federal Railroad Association*
ASTM E 1354 (ISO 5660)	Taux de dégagement de chaleur et de fumée visible pour les matériaux et produits, mesurés avec calorimètre à cône par absorption d'oxygène	AM60B	Bodycote	4,1 mm	Aucune combustion
Bombardier SMP-800-C	Analyse de CO, HF, HCN, HBr, SO et NO dans les gaz de combustion	AM60B	Bodycote	4,3 mm	Rencontre la norme de Bombardier

Noranda a réalisé en 2002 dans son propre laboratoire des tests d'inflammabilité sur le magnésium et a conclu que cet alliage respectait la norme NSVAC/FMVSS 302. Bien que le laboratoire de Noranda ne soit pas certifié par le bureau d'accréditation canadien lors de la réalisation de ce test, nous n'avons pas jugé pertinent de reconduire celui-ci comme l'utilisation actuelle du magnésium par l'industrie automobile démontre, hors de tout doute, que ce matériau satisfait déjà cette norme. Cependant, le fabricant de siège

devra faire qualifier de nouveau, par un organisme certifié, l'alliage magnésium choisi face à la norme FMVSS 302. *Il est aussi fortement recommandé que ces tests de qualification soient réalisés avec la finition, c'est-à-dire l'apprêt et peinture recouvrant le magnésium qui pourrait être appliquée sur le siège afin de le protéger soit contre la corrosion ou les actes de vandalisme ou tout simplement pour des raisons d'esthétisme.*

Comme il n'a pas été possible d'obtenir une certaine grandeur d'échantillon de l'alliage AM60B pour le test ASTM E 162, l'alliage AZ31 a été utilisé pour la réalisation de ce test. Cependant, bien qu'un nouveau siège utilise fort probablement l'alliage AM60B, un expert de Norsk Hydro, l'un des principaux producteurs de magnésium, a confirmé que les résultats ne sont pas influencés par la légère différence (3 % d'aluminium) dans la composition de ces deux alliages.

Les résultats des tests effectués par la firme indépendante Bodycote en Ontario démontrent que les alliages de magnésium AM60 et AZ31 répondent aux normes de l'industrie des autocars et des trains quant à l'inflammabilité des matériaux et l'émission de fumée toxique pouvant être émise lors d'une exposition à des chaleurs intenses. Les rapports des quatre tests effectués par Bodycote sont présentés à l'annexe B.

3.2.2 Tests typiques des fabricants de sièges

L'étude des différentes normes démontre qu'il y a deux principaux cas de charge à considérer lors de la conception de sièges passagers, c'est-à-dire les cas de charges statiques et dynamiques.

Typiquement, comme c'est le cas lors de la conception de pièces pour le secteur automobile, les cas de charges statiques servent à pré-dimensionner le siège lors des premières phases de conception tandis que les cas de charges dynamiques servent à les optimiser lors des phases avancées de conception.

L'utilisation presque universelle aujourd'hui de la méthode de calcul par éléments finis lors du développement de nouveaux produits permet de réaliser dès le départ les analyses des deux principaux cas de chargement. Une fois complétées, ces premières analyses permettent aux ingénieurs d'identifier le pire cas de charge influençant de façon radicale les dimensions finales de la pièce à concevoir. Une fois ce ou ces pire(s) cas connu(s), les ingénieurs poursuivront les optimisations des dimensions du siège tout en s'assurant que le concept révisé respecte tous les autres cas de charge.

Lors de la réalisation de tests sur les nouveaux sièges dédiés au transport en commun, un manufacturier de sièges s'inspire généralement fortement de la norme européenne CEE 80 :

- application de forces sur le dossier, la structure d'assise, les coussins, les attaches de ceintures, les appuie-bras, les tablettes et le repose-pied;
- tests de fatigue et durée de vie sur les composants mobiles : appuie-tête, dossiers, appuie-bras et repose-pied;
- essais afin de simuler l'écrasement des différents coussins par les utilisateurs (voir norme de l'APTA, tableau 11).

Deux principaux défis sont à relever lors d'un projet de conception d'un siège pour les autocars. Il s'agit d'optimiser correctement :

- la géométrie du dossier du siège afin qu'il absorbe correctement l'impact du passager arrière projeté vers l'avant et qu'il protège au même moment le passager assis sur le siège;
- l'ancrage d'un siège double afin que celui-ci ne se déchire pas et ne provoque ou ne soit la cause de blessures graves aux occupants.

Les tests à être réalisés en laboratoire sur un nouveau siège en magnésium devront permettre de valider dans un premier temps les analyses structurales effectuées numériquement sur le concept de siège et s'assurer, dans un deuxième temps, que la technologie de mise en forme sélectionnée est en mesure de satisfaire les critères d'homologation de la norme prescrite par le client utilisateur.

Un autre point important à souligner est que, peu importe le matériau sélectionné pour la construction d'un nouveau siège plus léger, aucune pièce structurale du siège ne peut présenter après le test de collision de pointes tranchantes ou fracturées pouvant causer des blessures corporelles aux passagers. À cet égard et plus particulièrement pour les pièces d'ancrage du siège, il vaudra la peine d'étudier non seulement des pièces moulées mais aussi des pièces extrudées ayant typiquement des propriétés mécaniques supérieures.

Essai de corrosion

La norme de l'APTA, *Standard Bus Procurement Guidelines*, mentionne qu'il est important que tous nouveaux matériaux utilisés dans les autobus puissent résister à la corrosion soit par leurs propriétés intrinsèques ou à l'aide d'un revêtement de surface. Les matériaux doivent donc passer un test d'exposition à un brouillard salin pendant 336 heures selon la norme ASTM B-117, sans aucun dommage pouvant compromettre l'intégrité structurale du matériau et sans perte de poids de plus de 1 %.

Dans le cas d'un siège, ce composant étant à l'intérieur du véhicule, il n'est pas exposé aux intempéries. Toutefois, la partie du siège en contact direct avec le sol (structure d'ancrage) peut être exposée à la neige, à l'eau, au sel et aux produits nettoyants. Le concept de siège présenté à la section 4.4.3 prévoit pour l'ancrage au sol l'utilisation d'une pièce en aluminium extrudée déjà couramment utilisée sur plusieurs concepts de sièges européens et présentant de meilleures propriétés mécaniques.

Quant aux armatures du coussin et du dossier, il est possible de les concevoir de façon à éliminer le retient de tout liquide (liqueur, café, eau, etc.) déversé accidentellement sur le siège; ce qui prévient toute corrosion galvanique en présence d'autres matériaux. Il est important de préciser que le magnésium peut corroder très rapidement s'il est mis dans un milieu galvanique. C'est pourquoi on doit toujours isoler le magnésium à l'aide de matériaux neutres (tels que des polymères) afin qu'il ne devienne pas une électrode sacrificielle lorsque mis en contact direct avec de l'aluminium, de la fonte grise ou de l'acier dans un milieu aqueux.

Il est intéressant d'ajouter que les armatures de sièges en magnésium utilisées dans les automobiles ne sont pas soumises à un traitement de surface contre la corrosion puisque ces pièces ne sont pas en contact direct avec des éléments corrosifs.

3.2.3 Comparaison avec les tests de l'industrie automobile

Nous cherchons ici à établir une comparaison entre le cahier des charges des applications existantes dans l'industrie automobile et celui de la norme européenne CEE 80 largement utilisée lors du développement de nouveaux sièges d'autocars.

En étudiant de plus près les normes de l'industrie automobile pour la conception des sièges en magnésium et des supports de planche de bord, il y a plusieurs points techniques intéressant à faire ressortir.

Sièges automobiles en magnésium

Les sièges des voitures sont soumis à la norme NSVAC/FMVSS 207, c'est-à-dire :

- une décélération de 20 G dans les deux directions (horizontale et verticale);
- un moment de 373 N·m sur la partie supérieure du dossier;
- un effort combiné de la décélération et de la force exercée par la ceinture de sécurité si celle-ci est montée à même le siège (cas de la majorité des sièges déjà sur le marché);
- des contraintes induites sur le siège lors d'une collision sur le côté de la voiture;
- des contraintes de sous marinage;
- des moments induits lors de collisions de l'arrière du véhicule.

En comparant ces efforts à ceux de la norme CEE 80 ou même ADR 68, on remarque que le cahier de charge d'un nouveau siège passager en magnésium pour les autocars est moins sévère que celui pour un siège automobile.

La principale raison expliquant les plus grandes contraintes imposées sur les sièges automobiles vient du fait que la décélération d'une voiture lors d'une collision est supérieure à celle d'un autocar étant donné la grande différence d'inertie. Une décélération plus rapide d'une voiture engendre donc nécessairement une augmentation des efforts transmis aux différents composants du véhicule dont les sièges.

Cette comparaison nous permet d'avancer que *la conception d'un siège passager pour les autocars est possible sachant qu'il existe déjà pour l'industrie de l'automobile des sièges fabriqués en magnésium soumis, lors de leur homologation, à des cas de chargements équivalents et/ou supérieurs à la norme la plus sévère dans le secteur des autocars.*

Un article présenté à la conférence annuelle du SAE en 1994 [8] décrit les conclusions positives des analyses par éléments finis réalisées lors du développement d'un nouveau dossier de siège en magnésium ainsi que des essais réalisés sur des prototypes selon les normes FMVSS 208 et 210.

Supports de planche de bord des automobiles

Il est important de noter que cette pièce joue un rôle critique lors d'une collision et qu'il aide à minimiser le risque de blessure des occupants dans le cas où ceux-ci (attachés ou non) seraient projetés vers l'avant lors d'un impact.

Un support de planche de bord en magnésium doit satisfaire les normes suivantes :

- NSVAC et FMVSS 201 – Choc de la tête (CEE 21 et ADR 21)
- NSVAC et FMVSS 204 – Déplacement maximal de la colonne de direction
- NSVAC et FMVSS 208 – Protection de l'occupant lors d'un impact secondaire
- NSVAC et FMVSS 214 – Protection en cas de collision latérale

Étant directement attaché aux piliers avants du véhicule et devant empêcher l'intrusion du moteur dans l'habitacle tout en soutenant des composants critiques tels que la colonne de direction, le système de climatisation et les sacs gonflables, le support de planche de bord est probablement le composant qui illustre le mieux les nombreuses possibilités des alliages de magnésium.

Afin de pouvoir passer avec succès les nombreux essais de validation, ce composant doit présenter les caractéristiques suivantes :

- résister aux efforts élevés lors de collision;
- absorber l'énergie et la dissiper en se déformant;
- posséder de bonnes propriétés mécaniques au fluage;
- présenter des caractéristiques mécaniques élevées (élongation, limites élastique et ultimes);
- avoir une grande rigidité afin d'assurer une fréquence de résonance au-dessus de 35 Hz;
- fournir une grande précision dimensionnelle en mesure de simplifier l'assemblage des différents composants.

Les différents essais effectués sur les supports de planche de bord en magnésium par l'industrie automobile, plus particulièrement ceux liés à l'absorption de l'énergie lorsqu'un occupant non attaché est projeté directement sur la pièce, permettent d'avancer qu'*il ne devrait pas y avoir de problèmes majeurs à concevoir un nouveau siège passager en magnésium pour les autocars capable de supporter et d'absorber l'énergie de l'occupant arrière projeté vers l'avant sur le dossier du siège.*

3.3 PROPRIÉTÉS DES ALLIAGES DE MAGNÉSIUM

Cette section introduit les propriétés mécaniques du magnésium et de ses alliages comparativement à d'autres matériaux. Diverses applications courantes du magnésium dans le secteur automobile seront aussi présentées afin de démontrer les grandes possibilités d'utilisation dans le secteur du transport.

3.3.1 Introduction au magnésium

Le magnésium est le plus léger de tous les éléments structuraux. Il est le huitième élément le plus commun et représente quelque 2,7 % de la composition de la croûte terrestre. Le magnésium n'existe pas dans sa forme métallique à l'état pur. On doit l'extraire de certains minerais tels que la magnésite, la serpentine, la dolomite, etc. et/ou de l'eau de mer où on le retrouve abondamment.

Le magnésium métallique produit par extraction de minerais ou de l'eau de mer est appelé généralement magnésium primaire. Le magnésium est utilisé pour des applications non structurales comme par exemple :

- élément d'alliage pour les alliages d'aluminium (40-45 % de la consommation);
- désulfuration de l'acier (environ 10 % de la consommation);
- diverses applications chimiques et électrochimiques (10 % de la consommation).

Au niveau des applications structurales (35-40 % de la consommation totale), le magnésium est principalement utilisé pour le moulage sous-pression de pièces pour l'industrie automobile et le moulage (sous-pression et thixomoulage) de boîtiers de produits électroniques (caméra, ordinateur, téléphone portable, etc.). Le magnésium est aussi utilisé pour certaines applications dans les secteurs aéronautique et militaire avec des technologies de moulage par gravité, c'est-à-dire les procédés de moulage au sable, permanent, au plâtre, à la cire-perdue et à basse pression.

Pour des volumes de production variant de faible à très élevé, il est intéressant de savoir que les technologies de moulage par gravité sont couramment utilisées pour le développement de nouvelles applications peu importe le secteur d'application.

Par exemple, lors du développement de nouvelles pièces dédiées au secteur de l'automobile, il est courant de produire les pièces initialement à l'aide du procédé de moulage au sable avant de développer l'outillage qui servira à les produire à l'aide de la technologie du moulage sous-pression.

Tout comme le magnésium sert d'éléments d'alliage à d'autres métaux, on ajoute souvent au magnésium pur de faibles quantités d'autres éléments pour constituer des alliages de magnésium avec des propriétés améliorées. Les éléments les plus utilisés sont l'aluminium, le zinc, le manganèse, le silicium, le fer, le cuivre et les terres rares.

Les alliages les plus utilisés dans le secteur automobile sont les alliages AM50, AM60 et AZ91D pour les pièces moulées, tandis que pour les produits ouvrés (extrusion et laminage), l'alliage AZ31 est le plus commun.

À titre indicatif, les lettres et les chiffres utilisés pour la nomenclature des alliages de magnésium servent à indiquer respectivement les principaux additifs ajoutés au magnésium pur et le pourcentage de ceux-ci dans la composition de l'alliage. Par exemple, pour l'alliage AM60, la première lettre et le premier chiffre indiquent que l'aluminium a été ajouté au magnésium dans une proportion de 5,5 à 6,5 % du poids total. La deuxième lettre et le second chiffre indiquent que du manganèse a été ajouté dans une proportion de 0,26 à 0,50 % du poids total.

Le développement d'alliages aux propriétés spécifiques est un élément clé du développement de nouvelles applications. Ainsi, l'élimination du fer et du nickel des alliages de magnésium au début des années 1980 a permis l'amélioration de sa résistance à la corrosion et le développement de nombreuses nouvelles applications pour le secteur automobile.

Lors de l'étude des différents alliages en fonction des différentes technologies de mise en forme, on remarque rapidement que le nombre d'alliages de magnésium est limité quand on le compare aux alliages d'aluminium déjà disponibles. Cependant la situation

progresse et de nouveaux alliages voient le jour afin d'étendre les champs d'application du magnésium.

Au cours des dernières années, plusieurs des grands producteurs de magnésium ont travaillé au développement de nouveaux alliages résistant au fluage à haute température et pouvant être facilement utilisés pour le moulage sous-pression. Citons Noranda qui a développé l'alliage AJ62 qui est sur le point d'être utilisé par BMW pour le moulage d'un nouveau bloc moteur [9]. Des recherches effectuées par Noranda [10] démontrent que l'alliage AJ62L offre une plus grande capacité d'absorption d'énergie que l'alliage AM60B.

Un autre producteur, Dead Sea Magnésium, a développé récemment l'alliage MRI 153. Volkswagen, l'un des actionnaires de Dead Sea Magnesium, a procédé à de nombreuses études et bancs d'essai depuis la mise en marché de ce nouvel alliage. Des experts de l'industrie prévoient que de nouvelles applications verront bientôt le jour avec cet alliage sur les voitures de Volkswagen et de sa division Audi.

3.3.2 Propriétés mécaniques des alliages de magnésium

Plusieurs caractéristiques font aujourd'hui du magnésium un matériau de choix pour divers procédés et applications (voir article publié au SAE en 1993 [12]), dont notamment :

- le plus léger des métaux structuraux
- rigidité (meilleur rapport rigidité/densité)
- grande formabilité (meilleure fluidité à l'état liquide que l'aluminium)
- capacité d'absorption des vibrations (réduction des vibrations transmises aux passagers et possibilité d'améliorer le confort dans certains cas)
- capacité de protection électromagnétique
- conductivité thermique
- facilité d'usinage
- capacité d'être recycler à faible coût
- résistance à l'impact et aux bosselures

Le tableau 19 présente les propriétés de l'alliage AM60 par rapport à l'aluminium A380, à l'alliage de zinc Zamak3 et à l'acier 1020.

Tableau 19. Propriétés mécaniques des alliages de magnésium et autres matériaux

Propriété	Unité	AM60B (Mg)	AJ62L (Mg)	A380 (Al)	Zamak3 (Zn)	Acier 1020 (*cold rolled*)
Module de Young - tension - cisaillement et torsion	 GPa GPa	 45,0 17,0	 44,7 N/D	 71,0 26,5	85,5	205,0 80,0
Coefficient de Poisson		0,35	0,28	0,37	0,39	0,29
Densité	g/cm^3	1,79	1,8 [a]	2,68	6,6	7,87
Limite élastique	MPa	130	144	160	221	350
Limite à la rupture	MPa	220	254	320	283	420
Limite élastique en compression	MPa	130	109	N/D	414	
Élongation	%	6-8	9	3,5	10	10-15 %
Limite maximale en fatigue (Réf. : R.R. Moore 5 x 10^8 cycles)	MPa	70	N/D [b]	138	47,6 [d]	N/D
Coefficient d'expansion thermique (entre 20 – 100 °C)	µm/m·K	26,0	27,31 [c]	21,8	27,4	11,7
Capacité d'amortissement spécifique (à 100 MPa)	%	53		4		N/D
Énergie à l'impact - essai Charpy, 10 x 10 mm échantillons sans entaille - barreau lisse	J	6-18	9,6		58,3	N/D

a : Valeur du AJ52x mesurée par le mouleur sous-pression Intermet [13]
b : Essais en cours de réalisation (d'ici la fin de 2004). Valeur du AJ62x calculée : 80 MPa, fatigue axiale R= -1 pour 10 millions de cycles [9]
c : Valeur du AJ52x de la base de donnée de Noranda
d : Test de fatigue selon la norme DIN 50113

La propriété qui distingue le plus le magnésium est sa légèreté. Il est 33 % plus léger que l'aluminium et quatre fois plus léger que l'acier. Une autre propriété importante qui le distingue est son ratio rigidité/densité où il se classe au premier rang de tous les matériaux utilisés pour des applications structurales. Et une troisième, tout aussi importante que les deux précédentes, est sa capacité d'absorber l'énergie de vibration.

On remarque que le ratio des modules de Young de l'alliage AM60 par rapport à l'alliage A380 est à peu près égal au ratio des densités. De même, on note que la limite élastique et celle à la rupture de l'alliage AM60 sont inférieures respectivement de 19 % et 31 % à celles de l'alliage d'aluminium A380. Au niveau de l'élongation, les alliages de magnésium permettent des élongations près de deux à trois fois supérieures que celle de l'aluminium A380.

Lors d'un impact où un passager du siège arrière serait projeté sur le dossier du siège devant lui, une grande élongation des alliages de magnésium permet d'absorber une plus grande quantité d'énergie, donc d'amortir plus progressivement le mouvement du passager projeté vers l'avant. Cette caractéristique des alliages de magnésium est l'une des principales raisons qui ont poussé les constructeurs nord-américains à les utiliser pour les armatures de volant automobile ainsi que pour la traverse inférieure servant à protéger les jambes des passagers avants lors d'un impact.

L'alliage AM60B est aujourd'hui l'un des alliages de magnésium les plus couramment utilisés. On l'utilise par exemple pour la fabrication des armatures de volant, des sièges automobiles et des supports de planche de bord. En compagnie des autres alliages de la série AM (AM60B, AM50A et AM20), on le retrouve pour la fabrication du support de radiateur et pour de nombreuses autres applications demandant une bonne élongation, une excellente résistance à la corrosion ainsi qu'une dureté et une résistance à l'impact capable de soutenir une force raisonnable.

Lors de l'évaluation du coût de production d'un siège passager présenté au chapitre 4, l'alliage AM60B sera l'un des alliages suggérés pour le moulage sous-pression. Cependant, le nouvel alliage AJ62L de Noranda présente des propriétés tout aussi intéressantes et même, dans certains cas, supérieures à celles de l'alliage AM60B au niveau de l'élongation et de la limite élastique. Pour cette raison, ces deux alliages devront être évalués de façon plus détaillée dans le cadre d'un projet de conception de siège.

Afin de mettre à profit les propriétés mécaniques du magnésium, légèrement inférieures à celles de l'aluminium, il est important lors de la conception de nouvelles pièces d'utiliser au maximum l'effet combiné de :

- l'augmentation de l'inertie des différentes sections d'une pièce;
- l'utilisation de nervure à fines parois;
- l'utilisation d'une épaisseur de paroi réduite, typiquement de 2 à 4 mm;
- la consolidation de plusieurs pièces en une seule;
- la possibilité de mouler des formes plus complexes grâce à l'excellente fluidité du magnésium.

Ceci nécessite que les concepteurs et les ingénieurs aient une excellente connaissance des alliages de magnésium, des différents procédés de mise en forme ainsi que des différents outils de simulation numérique afin de correctement optimiser la nouvelle pièce en fonction d'un cahier des charges spécifique.

Grâce à la combinaison ingénieuse de ses propriétés, le magnésium a réussi à déloger des applications structurales où jadis l'acier était roi et maître et cela même si le module de Young du magnésium est inférieur à près de cinq fois celui de l'acier. Cependant, il faut aussi tenir compte de certaines faiblesses. Par exemple, ses propriétés limitées au fluage qui, dans bien des cas, requièrent d'augmenter le nombre de points d'attache des boîtiers d'engrenage ou encore sa résistance à la corrosion où les pièces en magnésium doivent être isolées des pièces en acier afin d'éviter la corrosion galvanique.

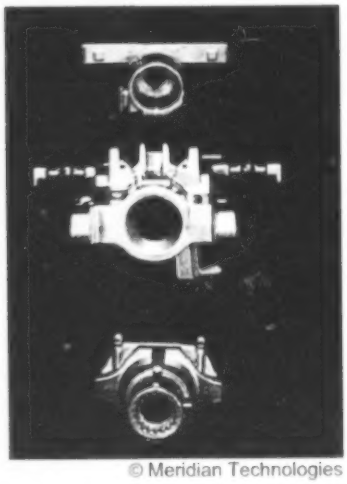
3.3.3 Applications dans le secteur du transport

Le magnésium est utilisé depuis longtemps dans le secteur du transport. Dès le début des années 1900, les Allemands l'ont utilisé pour des applications militaires. Certains des avions allemands et américains de la 2^{e} guerre mondiale ont été construits en large partie de magnésium à l'aide de pièces moulées, extrudées et de feuillards. On cite par exemple les modèles Arado 196, US XP56 et le F-80.

Volkswagen, au cébut des années 1940, a utilisé le magnésium de façon importante pour la fabrication de nombreuses pièces de sa fameuse coccinelle (bloc moteur refroidi à l'air, les boîtiers de transmission, etc.). Néanmoins, après la fin de la deuxième guerre mondiale et jusqu'au début des années 1980, le magnésium a été un peu mis de côté dû notamment à la sensibilité à la corrosion des premiers alliages et à une production très limitée. C'est finalement la production d'alliages de magnésium de grande pureté qui a permis d'atteindre des niveaux de résistance à la corrosion comparables à ceux des alliages d'aluminium. Combiné aux améliorations effectuées sur les presses utilisées pour le moulage sous-pression (temps de cycle, vitesse du vérin, système hydraulique, etc.), ces alliages ont ouvert la voie au développement de nombreuses nouvelles applications structurales en magnésium pour le secteur automobile.

La grande percée des applications de magnésium a donc débuté dans les années 1980 et s'est poursuivi activement dans les années 1990 alors que les constructeurs automobiles subissaient la pression des normes environnementales américaines (CAFE) afin d'alléger le poids des véhicules ou tout au moins, d'atténuer l'augmentation de poids.

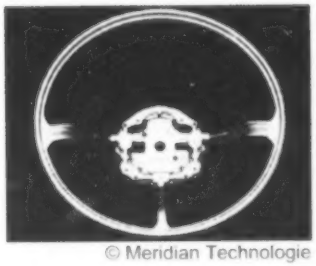
Au début des années 1980, les constructeurs ont commencé à utiliser le magnésium pour la fabrication d'une partie du boîtier de la colonne de direction et de l'armature du volant. Cette dernière application a connu un franc succès et a largement contribué à faire connaître le magnésium à travers le monde. Aujourd'hui, environ 85 % des armatures de volant sont fabriquées avec des alliages de magnésium.



© Meridian Technologies

Poids des trois pièces : 1,1 kg

Figure 10. Composants en Mg de la colonne de direction (Daimler Chrysler)



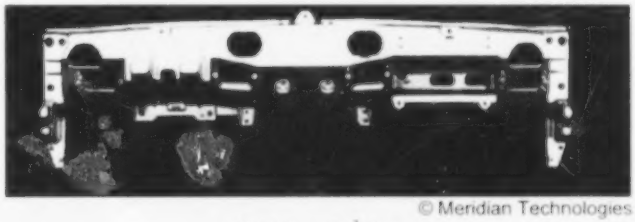
© Meridian Technologie

Poids : 0,7 kg

Figure 11. Armature de volant en Mg (Alfa Romeo)

En plus des armatures de volant, l'application qui a permis la plus forte croissance dans l'utilisation du magnésium dans le secteur automobile est sans contredit le support de planche de bord (aussi appelé support ou structure de tableau de bord) où le magnésium a fortement concurrencé les traverses d'acier.

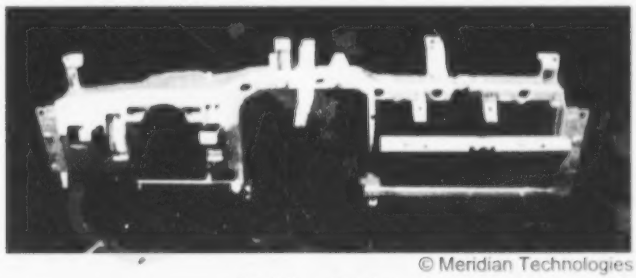
En effet, on a assisté au début des années 1990 au remplacement des traverses d'acier servant à supporter les colonnes de direction et tous les autres accessoires du tableau de bord par une seule et unique pièce moulée en magnésium. Typiquement, le moulage sous-pression de ces supports en magnésium permet de remplacer jusqu'à 70 pièces de tôles pliées et soudées servant à fabriquer la traverse. Outre une réduction importante de poids, cette consolidation permet une simplification de l'assemblage (donc une réduction des coûts de fabrication) et une réduction des vibrations (moins de pièces jointes) souvent jugées désagréables par les propriétaires de véhicules. Aujourd'hui, on retrouve ces pièces en magnésium dans un grand nombre de voitures de luxe et de véhicules utilitaires (voir exemples des figures 12 et 13).



© Meridian Technologies

Poids : 3,6 kg

Figure 12. Support de planche de bord en Mg de la Mini de BMW



© Meridian Technologies

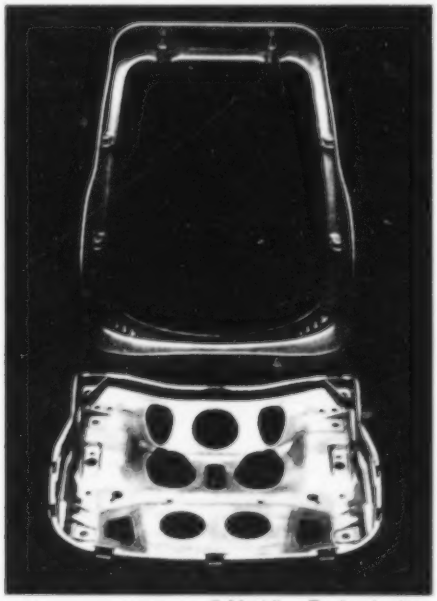
Poids : 5,5 kg

Figure 13. Support de planche de bord en Mg de la Ford Explorer

Puis progressivement, le magnésium a été utilisé pour le développement des couverts de valves, des supports de pédalier, du boîtier des sacs gonflables, des structures de sièges, des boîtiers de transmission, des structures de toit ouvrant et la plus importante, le développement des supports de planche de bord pour de nombreux modèles de GM, Ford puis des autres grands constructeurs comme Fiat, Jaguar, Daimler Chrysler, BMW, etc. Les figures 14 à 16 illustrent certaines de ces applications.

Plus récemment, on a assisté au développement de nouvelles pièces encore plus imposantes telles que le hayon arrière de la Lupo 3-litres développée et produite par

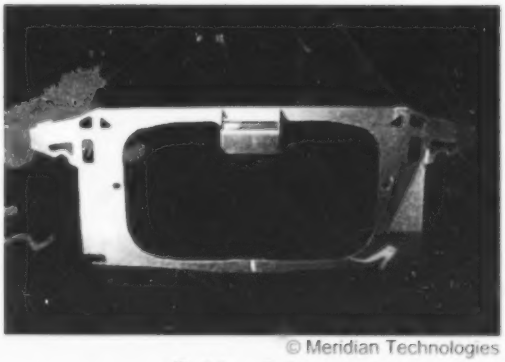
Volkswagen, le support de radiateur développé pour le Ford Explorer, le pilier B sur les deux côtés de la voiture ainsi qu'une partie du siège arrière de la fourgonnette de DaimlerChrysler. Les figures 17 à 20 illustrent certaines de ces applications.



© Meridian Technologies

Poids du dossier : 1,0 kg; poids du coussin : 1,1 kg

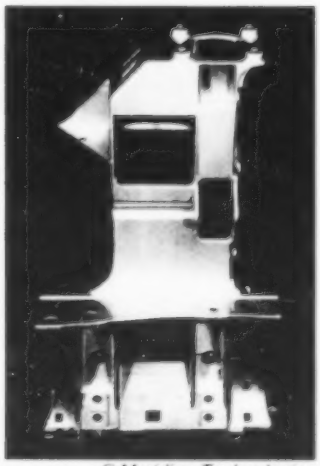
Figure 14. Structure de siège en Mg de l'Alfa Romeo 146



© Meridian Technologies

Poids : 6,1 kg

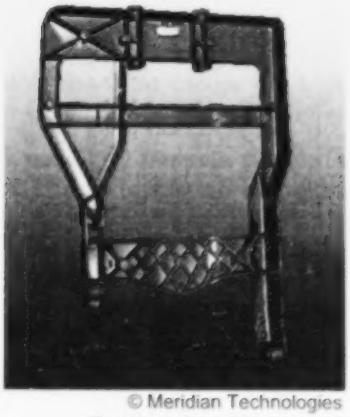
Figure 15. Support de radiateur en Mg de la Ford F-150 MRS



© Meridian Technologies

Poids : 3,2 kg

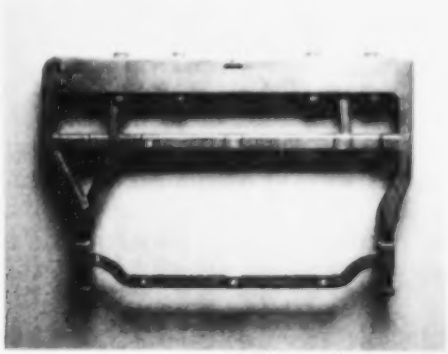
Figure 16. Support de pédalier en Mg de la Corvette de GM



© Meridian Technologies

Poids : 1, 0 kg

Figure 17. Dossier d'un siège arrière (40 %) en Mg



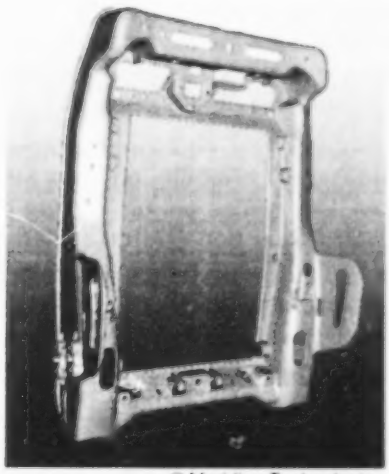
© Meridian Technologies

Poids : 1,4 kg

Figure 18. Dossier d'un siège arrière (60 %) en Mg

© Honsel Fonderie Messier

Figure 19. Pilier B en Mg d'une voiture de rallye



© Meridian Technologies

Poids : 1,80 kg

Figure 20. Dossier de siège avant en Mg de Jaguar

Tel que décrit à la section 2.4, l'utilisation du magnésium pour des composants de sièges ont aussi trouvé leur place auprès de constructeurs automobiles tels que GM, Ford/Jaguar, DaimlerChrysler/Mercedes Benz, Alfa Romeo, Toyota et plus récemment Renault qui utilisent encore aujourd'hui des composants de sièges en magnésium moulés sous-pression. Il est aussi intéressant de souligner que certains constructeurs

collaborent à des projets de R&D afin de rendre plus concurrentiel les extrusions de magnésium pour des applications comme les armatures de sièges [11].

3.3.4 Technologies de mise en forme

En étudiant les principaux matériaux utilisés dans la construction des sièges, on remarque que la majorité des sièges d'autocars sur le marché utilisent de l'acier et que certains commencent à utiliser l'aluminium. Les technologies de pliage pour l'acier et d'extrusion pour l'aluminium sont les plus couramment utilisées pour la fabrication de la partie structurale alors que pour les poses pieds, les tablettes et les accoudoirs, on y dénote de plus en plus l'utilisation des technologies de moulage pour la production à grande échelle de ces pièces.

Pour la fabrication de sièges en magnésium, seul les procédés de moulage sont présentement suffisamment économiquement matures pour être considérés aujourd'hui comme procédés industriels. En effet, les procédés de laminage (tôle) et d'extrusion pour des applications structurales dans le secteur des transports font présentement l'objet de plusieurs travaux de R&D tant au niveau des procédés eux-mêmes que des alliages afin d'obtenir des coûts plus concurrentiels.

Les procédés de moulage du magnésium

Le moulage permet d'obtenir des pièces ayant la forme et les dimensions définitives ou très proches de celles-ci. Il est à souligner que le magnésium possède un haut niveau de fluidité à l'état liquide, ce qui lui permet de remplir des moules beaucoup plus complexes que dans le cas de l'aluminium. Il existe divers procédés de moulage dont les principaux sont décrits ci-après.

- Le moulage ou coulage sous pression (*die casting*) est le plus utilisé pour le magnésium. Le moule, en deux parties, est réutilisable et peut produire de grandes séries. Les pièces ont une bonne précision dimensionnelle – ce qui réduit l'usinage ultérieur –, un bon état de surface et le refroidissement est rapide. Le métal peut être introduit sous basse ou haute pression. Le moulage sous haute pression (*high pressure die casting*) est le procédé le plus utilisé, notamment pour les pièces destinées à l'industrie automobile.
- Il existe dans le cas du magnésium une catégorie particulière de moulage sous pression appelée moulage semi-solide, notamment le thixomoulage ou moulage thixotropique. Ce procédé, breveté par la société américaine Thixomat, consiste à injecter à haute vitesse dans un moule des granules de magnésium à l'état semi-solide (état thixotropique), c'est-à-dire un peu en deçà du point de fusion. Dans cet état, on obtient alors des particules solides flottant dans une matrice liquide et le magnésium se comporte essentiellement comme un plastique. En fait, la technique ressemble davantage au procédé de moulage par injection utilisé dans le secteur des plastiques (*injection molding*) qu'au moulage sous pression traditionnel. Le thixomoulage a pour avantage de produire des pièces avec moins de porosité, à parois minces et présentant une meilleure finition de la surface. Ce procédé permet la production de grandes séries de pièces et est particulièrement utilisé pour remplacer les boîtiers de plastique des équipements électroniques. Toyota a notamment introduit ce procédé pour la fabrication d'armature de sièges en magnésium pour certains de ces modèles haut de gamme [14].

À l'opposé du moulage sous pression, on retrouve les procédés de moulage par gravité laissant couler le métal sous l'effet de son propre poids.

- Le moulage au sable est utilisé, entre autres, pour de petites séries de pièces (typiquement de moins de 1 000 pièces). Le moule est construit en deux parties, correspondant à chaque moitié du modèle, par compression du sable (auquel on ajoute parfois du ciment) dans un châssis. Après enlèvement du modèle, les deux parties du moule sont ensuite réunies. Le métal fondu est injecté par des canaux. Le refroidissement est très lent dans les moules au sable et permet un contrôle de la texture du métal. Le moule au sable est détruit au démoulage, mais le sable est réutilisé. La précision des pièces obtenues par cette technique varie de moyenne à bonne. Les principaux avantages de cette méthode résident dans la rapidité de moulage et le taux de récupération très élevé du sable. Bien que ce procédé soit typiquement utilisé et reconnu pour la production de faibles volumes, le nouveau procédé de moulage en sable en motte verticale permet aujourd'hui de s'attaquer à des productions de moyenne et grande série à des coûts compétitifs.
- On retrouve aussi le moulage à la cire perdue (*investment casting*). Ce dernier, très ancien, est surtout utilisé pour des pièces très complexes de haute précision généralement destinées aux secteurs aéronautique et militaire. La forme de la pièce à obtenir est d'abord réalisée en cire synthétique, avec une très grande précision, par un procédé de moulage classique. Ce modèle en cire, qui peut être très complexe, est enrobé d'un produit réfractaire. Après durcissement du moule réfractaire, la cire est fondue et extraite du moule. Celui-ci est cuit avant de recevoir l'alliage fondu, puis il est détruit pour libérer la pièce. Parmi d'autres techniques similaires, on retrouve le moulage «*lost-foam*».
- De nombreux autres procédés sont utilisés, comme le moulage au plâtre, où les moules sont fabriqués avec du plâtre et permettent d'obtenir des pièces complexes et minces avec une très bonne précision dimensionnelle.
- Le moulage à moule permanent (coquille) utilise un moule métallique comme pour le moulage sous pression, sauf que le métal est coulé par gravité. Ce procédé a pour avantages d'avoir un très beau fini de surface, d'être assez rapide et d'avoir une bonne précision dimensionnelle. Ce procédé se trouve donc à mi-chemin entre les procédés de moulage au sable et le moulage sous pression. Il permet la production d'un niveau moyen de pièces (plus de 1 000 pièces, mais il demeure moins productif que le moulage sous pression dont on peut obtenir de très grands volumes).
- Finalement, il existe une forme que l'on pourrait qualifier d'hybride, le *squeeze casting*, qui combine le procédé de moulage et celui de forgeage. Le métal liquide est coulé dans un demi-moule préchauffé et lorsque la solidification commence, la partie supérieure du moule est refermée en appliquant une pression durant le reste de la solidification. Des pièces de grande précision peuvent être produites, avec une faible porosité et des propriétés mécaniques améliorées.

Néanmoins, de tous ces procédés, c'est le moulage sous pression qui est le plus développé et pour lequel le niveau de maîtrise et d'optimisation est le plus élevé. Le magnésium moulé sous pression représente environ 95 % du magnésium transformé pour des applications structurales.

3.4 ENJEUX ÉCONOMIQUES

Il y a plusieurs enjeux économiques pouvant influencer le choix des manufacturiers et des opérateurs d'autocars lors de la sélection d'un nouveau siège passager. Une révision des études récentes publiées sur le sujet permet d'identifier ces principaux enjeux autant au niveau de l'impact sur l'environnement qu'au niveau des coûts d'acquisition et d'utilisation d'autocars avec une masse réduite.

La première étude en référence est celle réalisée par Martec Ltd. pour Transports Canada dans le cadre du programme de réduction du poids des autocars [3]. Publiée au début de l'an 2000, cette étude identifie clairement les principaux enjeux économiques à considérer lors du choix d'une nouvelle solution technologique permettant une réduction de poids.

Ces enjeux économiques sont :

- réduction du coût du cycle de vie et/ou d'entretien du véhicule;
- possibilité d'augmentation de la charge payante sur les autocars;
- réduction de la charge sur les trois essieux des autocars;
- réduction de la pollution produite par les autocars (particules en suspension, odeurs, etc.)
- réduction des émissions de gaz à effet de serre sur la durée de vie de l'autocar;
- dommages au réseau routier causé par les autocars annuellement.

L'analyse rapide de ces enjeux permet de constater que leurs importances varient selon le rôle joué dans l'industrie. Les trois premiers sont plus importants pour les manufacturiers et les opérateurs, tandis que les trois derniers le sont plus particulièrement pour le gouvernement canadien qui vise notamment à réduire les émissions polluantes des autocars suite à la signature du Protocole de Kyoto en 1997.

IC^2 Technologies inc. a réalisé en 2002 pour le compte de Meridian Technologies et en collaboration très étroite avec Multina une étude de faisabilité visant à comparer les coûts de développement et de production d'un siège en magnésium pour le secteur du transport en commun. Cette étude a identifié clairement les facteurs économiques influençant le prix total d'un siège, à savoir :

- le coût de développement des outillages de production pour le dossier, les accoudoirs et la structure portante du coussin;
- le coût de production de ces pièces en magnésium;
- le coût d'acquisition des autres pièces servant à l'assemblage du siège après une identification préalable des pièces requises pour la solution magnésium;
- le coût d'assemblage du siège en magnésium;
- le coût épargné pour la gestion d'un nombre réduit de pièces requis pour la solution magnésium;
- le coût épargné par le nombre réduit de pièces magnésium de mauvaise qualité par rapport à une solution en acier.

L'étude de cas présenté au chapitre 4 tient compte de tous ces facteurs économiques afin d'évaluer et quantifier la compétitivité d'un nouveau siège en magnésium par rapport à des solutions alternatives. On y calcule aussi le coût associé à la réduction du poids du siège d'un kilogramme pour le comparer au seuil généralement acceptable par l'industrie.

Mais auparavant, il est important de revenir ici sur certains constats de la première étude de faisabilité réalisée pour Meridian. Les résultats de cette étude ont mis en évidence qu'un siège magnésium moulé sous-pression ne pouvait, à ce moment, être concurrentiel par rapport à un siège en acier que pour des volumes annuels particulièrement élevés. Sachant que les clients ne sont pas nécessairement prêts à payer une prime pour l'acquisition de sièges plus légers, il avait été conclu que la solution en magnésium par moulage sous pression n'était pas encore viable.

Le choix du procédé de fabrication constitue donc aussi une question d'ordre économique importante puisqu'il influence largement les volumes requis et le prix du produit. Au chapitre 4, l'analyse de cas illustre les coûts ainsi que les avantages et inconvénients de solutions utilisant divers procédés.

Il est aussi important de constater que cette question du prix inhérent au procédé est intimement liée aux enjeux technologiques de performance de la solution magnésium. En effet, le choix du procédé de transformation le plus concurrentiel au niveau du prix n'implique pas nécessairement qu'il sera le plus concurrentiel au niveau des propriétés recherchées, notamment au niveau du poids de la pièce. En effet, certains procédés ne permettent pas, par exemple, des parois aussi minces que le moulage sous pression. Il y a donc vraisemblablement un compromis à faire entre prix et performance.

3.5 ACCORDS COMMERCIAUX

Le secteur des autocars est régi, comme l'ensemble de l'industrie automobile et des transports routiers, par les dispositions de l'ALÉNA, favorisant ainsi les échanges commerciaux entre le Canada, les États-Unis et le Mexique. Aucune contrainte particulière limite l'exportation de composants canadiens d'autocars tels les sièges vers les États-Unis ou le Mexique.

Soulignons toutefois qu'il en est autrement pour le secteur de l'autobus urbain et le secteur ferroviaire aux États-Unis. Bien qu'aucune barrière tarifaire formelle n'existe, ces secteurs fortement subventionnés par le gouvernement américain sont régis par le *Buy America Act*. Selon cette loi, l'acquisition de véhicules neufs est éligible à un support financier du gouvernement fédéral seulement si l'assemblage final des véhicules est réalisé aux États-Unis et qu'au moins 60 % de la valeur des composants soient aussi fabriqués aux États-Unis. Ceci explique d'ailleurs pourquoi plusieurs manufacturiers canadiens possèdent des usines d'assemblage et de finition aux États-Unis. Par ailleurs, il faut aussi noter que certaines sociétés non américaines bénéficient d'une exonération temporaire pour l'importation de certains produits.

4. ANALYSE COÛTS-AVANTAGES

Grâce aux résultats d'une analyse de cas, cette section vise à déterminer la faisabilité technico-économique de la fabrication à petite et grande échelle d'un nouveau siège en magnésium pour le marché des autocars. Le ou les meilleurs procédés de fabrication pour les premières années de production seront aussi identifiés.

4.1 MISE EN CONTEXTE

Deux autres études privées traitant du développement de sièges plus légers, réalisées et financées par la firme Meridian Technologies (spécialisée dans le moulage sous pression du magnésium), ont précédé celle-ci. L'étude de cas présentée ci-après est une continuation de ces premières études. Il est donc important de présenter brièvement pour chacune d'elle les objectifs visés lors de leur réalisation et les conclusions tirées qui serviront à poser les balises de l'analyse coûts-bénéfices présentée plus loin.

Réalisée au premier trimestre de 2001, la visée de la première étude consistait à dresser le portrait du marché d'un siège passager pour les trains rapides desservant les grandes villes nord-américaines. Cette étude a permis d'identifier entre autres qu'il y avait beaucoup de similitudes entre un siège plus léger pouvant desservir l'industrie du rail et celle des autocars.

Suite à ces démarches auprès des grands joueurs de l'industrie dont Prévost Car, Meridian et le fabricant de sièges Multina ont par la suite collaborées à la réalisation de la seconde étude réalisée durant l'hiver 2002 par la firme IC^2 Technologies inc. Cette seconde étude visait à comparer les coûts de fabrication et d'assemblage d'un siège passager en acier à un siège en magnésium pour les autocars. Malgré que les conclusions aient démontré que les coûts de développement d'un siège en magnésium avec le procédé de moulage sous-pression étaient à ce moment trop coûteux, la possibilité d'une réduction de poids d'environ 375 kilogrammes par autocar (50 à 52 passagers) a continué de susciter de l'intérêt.

La présente étude s'inscrit dans une continuité de cette démarche afin d'identifier des alternatives au moulage sous-pression permettant l'introduction d'un siège en magnésium à un coût moindre que ceux identifiés en 2002 tout en analysant les autres facteurs économiques et techniques pouvant justifier un tel projet.

4.2 PRINCIPAUX AVANTAGES RELIÉS À L'ALLÉGEMENT

La mise en oeuvre au Canada de l'accord de Kyoto au cours des prochaines années amène à étudier différents moyens permettant de réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Des études récentes effectuées notamment en Allemagne et au Canada identifient les principaux avantages liés à l'allègement des véhicules lourds tels les autocars. Sans reprendre ce qui a déjà été souligné en guise d'introduction à cette étude à la section 1.3, ces avantages sont décrits ci-après et ensuite comparés aux réponses obtenues lors d'entrevues auprès des principaux manufacturiers d'autocar, des fabricants de sièges et des opérateurs nord-américains.

Le principal objectif de cet exercice est de déterminer si les avantages de l'allégement identifiés par les études antérieures sont bien compris des ingénieurs qui fabriquent les sièges et les autocars et de valider si les gestionnaires qui les opèrent en tiennent compte lors de l'acquisition de nouveaux véhicules. Cette comparaison permettra ainsi de mieux aligner la stratégie de développement d'un nouveau siège.

Avantages identifiés en Europe

En janvier 2003, l'Institut International de l'Aluminium a publié les conclusions d'une étude européenne intitulée «*Energy savings by light-weighting*» réalisée par l'Institut de recherche sur l'énergie et l'environnement à Heidelberg en Allemagne [15].

Se référant aux chiffres publiés par l'Agence internationale de l'énergie (AIE), on y apprend que le secteur des transports consomme près de 26 % de la production d'énergie mondiale et près de 58 % de la production de carburants. D'où l'importance d'identifier les moyens afin de réduire cette consommation d'énergie et l'émission des gaz à effet de serre.

Cette étude, en comparant les réductions spécifiques de consommation d'énergie pour une réduction de poids de 100 kg et les coûts du cycle de vie pour les principaux véhicules circulant sur les routes et sur rail, démontre que :

- la réduction de poids d'un véhicule réduit la consommation d'énergie nécessaire pour sa propulsion (à l'exception de la résistance aérodynamique, la consommation d'énergie est directement proportionnelle au poids);
- l'allègement réduit l'impact environnemental lié à l'utilisation d'un véhicule et cela tout au long de ce que l'on pourrait appeler la chaîne énergétique (soit du réseau d'alimentation des stations d'essence jusqu'à la conversion de l'énergie dans le moteur);
- la consommation d'énergie d'un véhicule est déterminée par l'efficacité des différents composants d'un véhicule (transmission et moteur) et de la source d'énergie utilisée (essence, électricité, hybride, etc.);
- les économies d'énergies liées à une réduction de poids de 100 kg sont dépendantes de l'utilisation du véhicule; par exemple, les plus grandes économies d'énergie sont pour des véhicules devant effectuer de nombreux arrêts et départs comme les autobus urbains;
- les véhicules circulant à vitesse constante comme les autocars exposés à des résistances aérodynamiques importantes et une faible résistance à l'accélération sont ceux avec un faible potentiel d'économie d'énergie.

Avantages identifiés au Canada

Tel que décrit dans la mise en contexte de cette étude à la section 1.3, le CDT de Transports Canada a mis de l'avant en 1999 un projet de réduction de poids des autocars en collaboration avec des partenaires industriels. Avec deux des trois premières étapes déjà réalisées (janvier 2000 et 2004), ce projet vise à identifier les principaux concepts permettant d'alléger le poids des autocars afin d'aider les manufacturiers à fabriquer des véhicules qui aideront les opérateurs à résoudre des problèmes opérationnels et réglementaires liés aux surplus de poids.

Dans la première phase, quatre principaux avantages liés à l'allègement ont été identifiés :

- la réduction de la consommation de carburant (aérodynamique, résistance au roulement, réduction de poids et efficacité mécanique);
- la réduction des frais d'entretien sur les composants (synonyme d'augmentation de la fiabilité);
- la réduction des émissions polluantes;
- la réduction de l'usure de l'infrastructure routière.

Les deux premiers avantages ont une incidence directe sur les coûts du cycle de vie des véhicules pour les opérateurs, tandis que les deux derniers ont une incidence plus importante pour les gouvernements afin de respecter l'entente de Kyoto et minimiser les coûts d'entretien du réseau routier canadien.

Un autre avantage important décrit au point 1.3 est que l'allègement des autocars contribue à régler le **problème récurrent de surcharge par essieu** afin de rencontrer les normes provinciales régissant les véhicules lourds.

Parmi les autres avantages souvent identifiés, on peut citer l'augmentation de la capacité de charge de véhicules (lorsque la surcharge par essieu n'est pas un problème) ou encore la diminution du temps de freinage d'un véhicule plus léger.

Finalement, considérant qu'il y a de plus en plus d'autocars utilisés dans un milieu urbain (services de navette, services de liaison banlieue centre-ville, tours de ville, etc.) où les cycles arrêts-départs sont typiquement très nombreux, la réduction de poids engendrée a un impact important sur la consommation d'essence.

Autres avantages identifiés

L'élaboration d'un concept préliminaire dans le cadre de l'étude réalisée en 2002 par IC^2 Technologies inc. ainsi que des entretiens avec le fabricant de sièges Compin en Belgique ont permis d'identifier d'autres avantages intéressants qui ne sont pas liés uniquement à l'utilisation du magnésium, mais plutôt à l'utilisation de pièces moulées par opposition à des pièces pliées en tôle :

- augmentation des prestations en fréquence et de la rigidité du siège;
- intégration d'un plus grand nombre de composants et réduction du nombre de pièces requis par siège;

- réduction du temps d'assemblage, donc des coûts de fabrication;
- facilité de manutention d'un siège plus léger;
- possibilité de minimiser l'encombrement de la structure du siège afin de maximiser l'espace disponible pour les passagers;
- etc.

Perceptions et points de vue de l'industrie

En étudiant les réponses des industriels sondés pour cette étude, on constate que la réduction du poids des sièges passagers suscite de l'intérêt mais semble ne pas être prioritaire tant que le client ne l'exige pas. L'allègement est généralement moins important que le confort du siège sur de longue distance et la possibilité de maximiser l'espace disponible entre chaque rangée de sièges. À ce sujet, un représentant de l'industrie mentionnait que le faible encombrement et le confort des sièges passagers est, pour eux, un facteur discriminant dans le choix d'un fournisseur.

Un autre point de vue important soulevé, autant par les manufacturiers que par les opérateurs, est que la réduction du poids des sièges pour un total d'environ 375 kg est quelque peu minime par rapport au poids global d'un autocar chargé estimé à près de 20 000 kg. Pour eux, seul l'effet combiné de la réduction de poids de tous les autres composants structuraux de l'autocar permettra une réduction appréciable du coût d'entretien de ces véhicules de façon identifiable lors des analyses régulières des frais d'opérations.

D'autre part, on souligne aussi que les constructeurs ont une pression énorme de leurs clients pour construire des véhicules plus légers sans augmenter les coûts de fabrication. Sachant que le prix d'acquisition actuel d'un autocar se chiffre à près de cinq cent mille dollars et que ce montant représente près du tiers des frais d'opération d'un autocar durant son cycle de vie, on comprend mieux les enjeux technologiques et économiques auxquels font face les constructeurs et pourquoi les opérateurs recherchent une réduction de ce prix d'achat.

En bref, la consultation effectuée lors de cette étude confirme que l'industrie des autocars est intéressée par une réduction de poids significative des nouveaux véhicules, mais que les principales préoccupations des opérateurs se situent au niveau de la réduction de frais d'entretien et d'opération de leur flotte. Pour l'industrie, il n'est pas surprenant de constater que les avantages environnementaux et économiques visant à réduire les émissions de CO_2 ou minimiser les frais d'entretien du réseau routier ne sont pas prioritaires.

Notre enquête auprès de l'industrie révèle un intérêt très favorable au développement de sièges plus légers, mais dans la mesure où le siège :

- ne coûte pas plus cher à l'achat;
- présente un faible encombrement par rapport aux sièges déjà sur le marché;
- présente des coûts d'entretien plus faible;
- minimise les sources de bruits métalliques et les vibrations très désagréables sur de longues distances;

- présente des courbes attirantes pour le client;
- permet le port de la ceinture à 3 points;
- etc.

Certains des opérateurs ont aussi mentionné qu'ils s'intéresseraient à un siège plus léger seulement si des études de cas plus poussées avec de vrais prototypes démontraient des économies significatives liées à l'utilisation de ces sièges sur une longue période de temps. De plus, certains opérateurs d'autocars nolisés de l'ouest canadien ont aussi souligné l'intérêt de groupes de touristes européens d'avoir des autocars équipés de ceintures de sécurité.

4.3 IDENTIFICATION DES TECHNOLOGIES DE FABRICATION

La réduction potentielle du poids des sièges ne peut se faire sans l'identification d'une technologie de fabrication adéquate. Comme souligné à la section 4.1, les conclusions de l'étude réalisée en 2002 par Meridian et Multina ont mis en évidence les coûts trop élevés de développement de l'outillage d'un siège passager en magnésium avec le procédé de moulage sous-pression. D'où l'importance d'identifier d'autres procédés de transformation disponibles et de les comparer à ceux obtenus pour la technologie de moulage sous-pression.

En se référant à la section 3.3.4 présentant les principales technologies de moulage disponibles sur le marché, les technologies retenues pour la présente évaluation sont :

- le moulage au sable;
- le moulage permanent;
- le moulage sous-pression avec presse horizontale (méthode conventionnelle);
- le moulage sous-pression avec presse verticale;
- le thixomoulage.

La technologie du moulage au sable a été retenue puisqu'elle est déjà couramment utilisée pour le prototypage et/ou la fabrication de courte, moyenne et grande série de pièces pour les différentes industries du transport (automobile, camion, train et avion). Quant à la technologie du moulage permanent, elle a été retenue comme elle est déjà fréquemment utilisée pour la fabrication des pièces moulées en aluminium par certains constructeurs d'autocars. Par exemple, on utilise ce procédé pour la production de certaines pièces comme les appuis-bras, les piliers du porte-bagages ainsi que pour les jantes de roues. Cependant, afin d'obtenir des propriétés mécaniques équivalentes à celles qui seraient obtenues avec le procédé de moulage sous-pression ou de thixomoulage, il est nécessaire de traiter thermiquement les pièces une fois moulées.

Au niveau de la technologie *lost foam*, des demandes de soumission ont été envoyées à deux différents fournisseurs, mais aucun de ceux-ci n'a fourni de proposition. Dans le cas du premier fournisseur, les pièces étaient évaluées comme trop complexes alors que dans le deuxième cas, un incident récent dans leur fonderie a interrompu momentanément les opérations.

Les auteurs ont aussi considéré important de réviser les prix avec le procédé de moulage sous-pression afin d'établir un point de référence par rapport aux autres coûts présentés et de vérifier l'impact de la fluctuation du coût des alliages de magnésium au cours des dernières années. Par ailleurs, afin de tenir compte de certaines avancées technologiques, le moulage sous pression utilisant des presses verticales plutôt que les presses conventionnelles horizontales a aussi été retenu.

Le tableau 20 présente la liste des différentes technologies présentées pour lesquelles la section 4.4 présente les coûts de développement d'outillage et de production des pièces pour un nouveau siège magnésium. Dans le cas du moulage permanent, une soumission pour des pièces en aluminium a aussi été demandée afin de pouvoir considérer, si nécessaire en raison des coûts, une solution hybride mariant magnésium et aluminium.

Tableau 20. Technologies évaluées pour la conception d'un siège léger

Procédé	Mg	Al	Nombre de fournisseurs contactés	Alliages suggérés
Procédés de moulage par gravité				
Moulage au sable	X		2	AZ91
Moulage permanent	X	X	3	AZ91, A413 et A380
Procédés de moulage sous pression				
Presse horizontale	X		1	
Presse verticale	X		1	AM60B et AJ62L
Thixomoulage	X		2	
Nombre de fournisseurs différents			7	

Note : Tous les fournisseurs contactés sont localisés en Amérique du Nord.

4.4 ÉTUDE DE CAS

L'étude de cas qui suit présente les principaux coûts de développement et de fabrication d'un concept de siège passager en magnésium et les compare au coût typique d'un siège en acier tel que l'on retrouve actuellement sur la plupart des autocars en Amérique du Nord. Les coûts de développement et de fabrication d'un siège hybride mariant l'aluminium et le magnésium sont aussi présentés afin de valider si une approche hybride pourrait permettre d'introduire plus facilement un siège plus léger sur le marché.

4.4.1 Sources des données utilisées

Mis à part les coûts du dossier et du coussin inférieur fournis par les différents fournisseurs contactés lors de l'exercice de soumissions, tous les autres coûts liés à la fabrication du siège (coûts d'assemblage et d'inspection, coûts des pièces de quincaillerie, frais d'administration, etc.) sont directement extraits de l'étude de faisabilité réalisée par IC^2 Technologies inc. en 2002 auxquels a été ajoutée une indexation

annuelle de 2 %. Tous ces coûts avaient alors été évalués par Multina à partir du siège existant en acier utilisé par Prévost Car, siège présenté à la figure 22.

4.4.2 Coûts à considérer

Les principaux coûts pouvant influencer le coût total de fabrication d'un siège passager sont :

- coûts de fabrication des composants structuraux (dossier, siège, appuie-bras, appuie-pied, appuie-tête);
- coûts non récurrents (outillage de production, gabarits d'assemblage et de redressement);
- coûts des pièces de quincaillerie requises pour assembler tous les composants du siège;
- coûts d'assemblage des sièges nécessitant un apport humain (opérateur, inspecteur, contrôleur, acheteur, etc.);
- coûts de rembourrage et de garnitures des sièges;
- coûts de traitement de surface des pièces contre la corrosion et/ou pour la finition.
- coûts de traitement thermique et du gabarit de redressement si requis (par exemple, pour le moulage au sable et le moulage permanent).

Comme l'objectif de cette étude est d'identifier une technologie de transformation alternative au moulage sous-pression afin de commercialiser à un prix abordable un siège en magnésium, nous nous concentrons uniquement pour cette analyse sur les coûts de production des deux principales pièces du siège, soit le dossier et le siège inférieur.

Cette approche se justifie par le fait que le coût de développement et de production de ces deux pièces par le moulage sous-pression représentaient plus de 60 % des coûts d'un nouveau siège selon l'étude réalisée en 2002 et constituaient l'unique source de non compétitivité de la solution magnésium.

4.4.3 Concept de siège utilisé pour l'étude de cas

Le concept utilisé pour l'analyse de cas est celui qui a été développé dans le cadre de l'étude de faisabilité réalisée pour Meridian visant à comparer les coûts de développement d'un siège en acier à celui d'un nouveau siège en magnésium. Ce concept de siège magnésium est illustré à la figure 21. Le concept de siège en acier utilisé pour cette analyse de cas est celui présentement utilisé par Prévost Car et illustré à la figure 22.

Le concept en magnésium est composé d'une pièce moulée unique pour la partie inférieure du siège, de deux dossiers, des accoudoirs et d'une pièce extrudée pour l'ancrage du siège au plancher de l'autocar. Le support coussin monocoque est la pièce maîtresse de ce concept comme il est celui sur lequel on assemble les dossiers, les accoudoirs, les pièces extrudées ainsi que les différents mécanismes d'ajustement de position du siège. Ce support coussin est fixé à l'autocar à deux endroits différents. Son extrémité située du côté de l'allée est fixée au support d'ancrage extrudé directement

vissé au plancher tandis que son autre extrémité est vissée directement au mur intérieur de l'autocar en dessous des fenêtres.

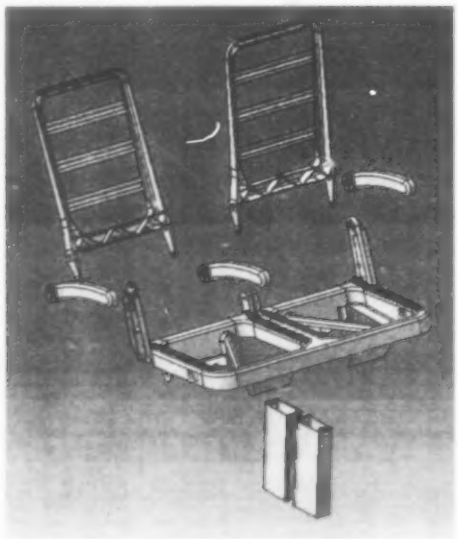


Figure 21. Concept de siège passager monocoque utilisé par Multina et Meridian Technologies (2002)

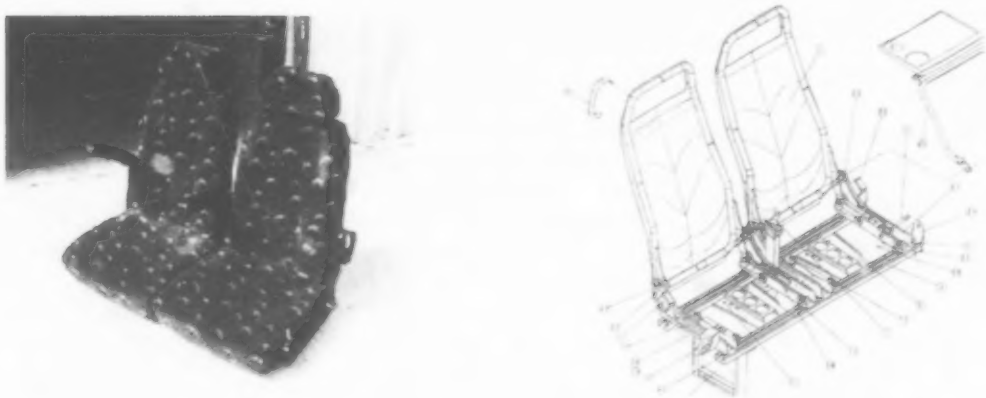


Figure 22. Siège en acier présentement utilisé par Prévost Car et ayant servi de référence pour l'analyse de cas

Des extrusions sont utilisées pour le support inférieur du siège parce que cette partie est soumise à des efforts très élevés lors d'une collision. Ainsi, afin de minimiser les risques de blessures aux passagers projetés vers l'avant lors d'une collision importante et les coûts additionnels reliés à un revêtement anti-corrosif, le concept proposé utilise des pièces extrudées en aluminium présentant de meilleures propriétés mécaniques que des pièces en magnésium moulées. Notre consultation des différents fabricants de

sièges et d'autocars a permis de valider la pertinence de cette décision, tant au niveau technique qu'au niveau économique.

À cet effet, il est important de souligner que les pièces en magnésium ont été conçues afin d'éviter toute accumulation d'eau ou d'autres liquides minimisant ainsi les risques de corrosion galvanique. Il faut aussi mentionner que le concept actuel vise à minimiser l'exposition directe des pièces de magnésium aux usagers afin d'éviter des surcoûts additionnels reliés à la protection de surface de ces pièces

4.4.4 Estimation de la réduction de poids

Les données de l'étude de faisabilité réalisée pour Meridian révèlent que ce concept en magnésium (deux places) engendre une réduction de poids de plus de 20 kg, soit une réduction allant jusqu'à 45 %, par rapport à une solution complète (siège entièrement assemblé) en acier utilisé par Prévost Car.

Toutefois, puisque les analyses structurales n'ont pas encore été réalisées sur ce concept de siège et que le poids final variera selon la décision du fabricant de le concevoir avec ou sans ceinture de sécurité à trois points, une réduction de poids de 15 kg par siège double sera retenue comme hypothèse de travail. Ceci représente une réduction totale d'environ 375 kg pour un autocar de 50 passagers. Cette hypothèse semble conservatrice considérant que plus de 5 kg de magnésium peuvent être ajoutés au concept afin de respecter le cahier des charges des clients.

Ainsi, pour les fins de l'analyse de cas, ce chiffre sera utilisé comme référence dans les calculs de réduction des émissions de CO_2 ainsi que ceux estimant la réduction de l'usure des principaux composants de l'autocar et du réseau routier.

4.4.5 Description des réductions de coût liées à un siège en magnésium

Cette section présente les grandes lignes des conclusions de l'étude réalisée en 2002 pour Meridian Technologies. Certaines données de cette étude sont présentées de façon relative afin de préserver la nature confidentielle des renseignements fournis.

La méthodologie suivie lors de cette étude a été très simple. Le personnel technique de Multina a sélectionné dans sa gamme de sièges passagers un siège en acier semblable à ceux typiquement fabriqués pour les autocars. Par la suite, toutes les différentes tâches effectuées par le personnel technique et administratif lors de la réalisation des différentes étapes en vue de l'assemblage du siège ont été comptabilisées.

Parallèlement, les ingénieurs de Multina se sont servis d'un siège passager déjà utilisés par Prévost Car afin de quantifier le coût de développement de l'outillage et de production des pièces d'un siège en acier tel qu'il existe déjà sur le marché. Cette démarche a été complétée par la préparation du concept en magnésium illustré à la figure 21 et d'un second concept en magnésium semblable à ceux fabriqués par les fabricants européens de sièges (support coussin pour les deux sièges séparé en deux morceaux et vissés à deux barres d'aluminium extrudées).

Pour les trois solutions étudiées, les coûts suivants ont notamment été identifiés :

- coûts non récurrents pour le développement de l'outillage;

- coûts unitaires des pièces;
- coût d'inspection des pièces;
- frais administratif pour l'achat et l'inspection des pièces livrées;
- coûts liés à la livraison de pièces non conformes;
- coûts des pièces de quincaillerie requise pour l'assemblage (vis, cylindre, mécanisme d'ajustement du siège, tissus, coussins, etc.);
- coûts des appuis-bras, repose-pied et appuis-tête.

Pour les trois solutions étudiées, cette étude a aussi pris en considération pour chacun des concepts:

- le poids final de chacun des concepts;
- le nombre total de pièces requises;
- le nombre total de fournisseur requis;
- le taux de rejet typique des pièces en acier par rapport aux pièces en magnésium;
- le nombre d'inspecteurs de la qualité requis lors de l'assemblage d'un nombre pré-déterminé de sièges;
- le nombre de problèmes d'assemblage éliminés par la plus grande précision dimensionnelle obtenue avec des pièces moulées.

Les principales conclusions de la comparaison des coûts d'une solution monocoque en magnésium par rapport à une solution en acier sont les suivantes :

- le nombre total de pièces structurales requis pour l'assemblage du siège magnésium monocoque est réduit de 10 %;
- le nombre et le coût des pièces de quincaillerie pour la solution magnésium sont chacun réduits de 50 % par rapport à la solution en acier;
- le nombre de fournisseurs pour la solution en magnésium est réduit de plus de 25 %;
- le temps d'assemblage d'une solution monocoque en magnésium est réduit de 12 %;
- le nombre de pièces rejetées est réduit de 10 % avec la solution en magnésium;
- pour des productions annuelles à très grand volume et sur une période de cinq ans, le coût pour le fabricant de sièges relativement au personnel technique et administratif alloué aux activités de fabrication du siège pouvait être inférieur de plus de 30 % au coût typique d'un siège semblable en acier;

En bref, des économies significatives au niveau de la main d'œuvre et des autres coûts afférents peuvent être réalisées par un fabricant de sièges si un nouveau siège en magnésium est fabriqué à l'aide des technologies de moulage et que les volumes de vente annuels sont suffisants. Cependant, le coût de développement de l'outillage pour la production de pièces moulées sous pression est la barrière économique à franchir afin de pouvoir bénéficier de ces économies.

Afin de tenir compte de la réduction du temps d'assemblage, du nombre de pièces, de la main d'œuvre et des autres facteurs énumérés ci-dessus, une réduction a été évaluée avec les ingénieurs de Multina à 2,00 $ par siège double en magnésium (pour les volumes de vente cités au tableau 21 pour les huit premières années de production) par rapport à l'assemblage d'un siège équivalent en acier.

4.4.6 Hypothèses des volumes de ventes

Les volumes de ventes requis pour l'étude de cas sont basés sur les hypothèses suivantes :

- tel que décrit au chapitre 2, le marché canado-américain pour les autocars neufs est estimé typiquement à 1 500 unités par année selon les analyses les plus conservatrices (le marché serait donc en train de revenir vers sa moyenne typique après une période de forte croissance);
- les sièges en magnésium cibleront initialement le marché des autocars haut de gamme;
- progressivement, le marché pourrait s'étendre vers le Mexique, dont le volume annuel de nouveaux autocars est de l'ordre de 1 900 unités;
- typiquement, un nouveau produit peut espérer atteindre une part de marché maximale d'environ 2 % lors de sa première année de pleine production;
- une moyenne de 25 sièges doubles par autobus.

Sur cette base et de façon plutôt conservatrice, des estimations de volumes ont été fixées pour la production des premiers prototypes et les huit premières années de production de série. Les estimations de coûts présentées au tableau 21 sont basées sur ces volumes.

Tableau 21. Hypothèse des volumes de ventes pour les huit premières années

Phase de développement et de commercialisation		Volume annuel estimé			
		Nombre d'autobus équipés des nouveaux sièges	Nombre de sièges doubles	Supports de coussin monocoque	Dossiers
Prototypes	An 0	1	**25**	x 1 unité	x 2 unités
Lancement commercial	An 1	10	**250**		
Production	An 2	20	**500**		
	An 3	40	**1 000**		
	An 4	60	**1 500**		
	An 5	100	**2 500**		
	An 6	150	**3 750**		
	An 7	200	**5 000**		
	An 8	300	**7 500**		

4.4.7 Analyse des coûts des différentes technologies

Pour chacune des technologies présentées au tableau 20, une demande de soumission pour les deux principales pièces du concept de siège en magnésium a été envoyée à divers fournisseurs. Dans les devis, il était demandé explicitement d'évaluer le concept du siège tel que développé pour la technologie de moulage sous-pression et d'indiquer s'il existait certaines contraintes pour la production de ces pièces autant au niveau des épaisseurs de parois que de la grosseur de la pièce.

Tous les fournisseurs ont répondu tel que demandé, sauf dans le cas de l'une des deux firmes contactées pour évaluer les coûts des diverses technologies de moulage par gravité. En effet, cette firme a initialement refusé de fournir des prix pour la production des deux pièces à l'aide du moulage permanent les jugeant trop complexes et donc trop risquées à produire. Après plusieurs échanges, les ingénieurs de cette firme ont finalement accepté de fournir une estimation de coût, mais seulement pour le dossier. Ils ont aussi déconseillé l'utilisation du moulage par cire perdue pour cette application. Toutefois, l'autre fournisseur contacté pour ces mêmes procédés n'a pas hésité à fournir ses prix tant pour le moulage au sable que pour le moulage permanent.

Les auteurs tiennent à préciser que les cotations reçues sont considérées comme fiables et représentatives des coûts réels de développement de l'outillage et de production des pièces si le concept de siège passager en magnésium était lancé à brève échéance. Dans certains cas, lorsque les auteurs ont eu un doute relativement à la fiabilité d'une source, les prix ont alors été vérifiés auprès d'autres fournisseurs. Il est aussi important de préciser que les mouleurs contactés oeuvrent dans la transformation du magnésium et/ou de l'aluminium depuis plus de 20 ans et qu'ils ont plutôt tendance à fournir des prix à la hausse lors d'un exercice de soumission de ce genre plutôt que des prix à la baisse.

Coût de développement de l'outillage et coût des pièces

Pour chacune des technologies analysées, le tableau 22 présente les différents coûts d'outillage. Il est à souligner que les presses pour le moulage sous pression à injection verticale ayant une capacité suffisante pour mouler la structure monocoque étaient encore en développement au moment de réaliser l'étude. La technologie devrait toutefois être disponible commercialement sous peu. Par ailleurs, les presses de thixomoulage actuellement disponibles sur le marché n'ont pas une capacité suffisante pour mouler la structure monocoque et il semblerait qu'aucune ne sera disponible à brève échéance.

Tableau 22. Coût de développement de l'outillage pour chacun des procédés

Procédé	Armature du coussin monocoque		Armature du dossier		Coût Total
	Coût	Durée de vie (unités)	Coût	Durée de vie (unités)	
Procédés de moulage par gravité					
Moulage au sable	29 000 $	< 2 000	25 000 $	< 2 000	54 000 $
Moulage permanent	112 800 $	70 000	57 900 $	70 000	170 700 $
Procédés de moulage sous pression					
Presse horizontale	420 500 $	50 000	248 000 $	50 000	668 500 $
Presse verticale	N/D [a]	50 000	235 000 $	50 000	N/D
Thixomoulage	N/D [b]	50 000	386 100 $	50 000	N/D

[a] : Presses de capacité suffisante en développement.

[b] : Aucune presse de capacité suffisante sur le marché.

On note à l'étude du tableau 22 que les coûts de développement de l'outillage des procédés de moulage sous-pression sont substantiellement supérieurs à ceux des procédés de moulage par gravité. Par contre, tel que présenté plus loin, les coûts de production unitaires sont largement inférieurs, ce qui justifient leur utilisation pour de grand volume.

De façon similaire, le tableau 23 présente le coût moyen des deux pièces principales du siège selon les hypothèses de volumes de ventes (dans le cas des procédés de moulage sous pression, les coûts sont basés non pas sur un volume annuel donné, mais sur un volume cumulé correspondant au total des huit premières années). Puisque les procédés de moulage sous pression à injection verticale et de thixomoulage ne permettent pas une solution complète, chacun de ces procédés à été combiné avec l'utilisation du moulage sous pression conventionnel pour l'armature monocoque.

Tableau 23. Coût de production des pièces selon le procédé de fabrication

Procédé de moulage	Proto	An 1	An 2	An 3	An 4	An 5	An 6	An 7	An 8
	Évolution des coûts unitaires ($) selon le volume annuel produit								
Armature du coussin monocoque	25	250	500	1 000	1 500	2 500	3 750	5 000	7 500
Au sable	310	290	278	274	272	272	272	272	272
Permanent	128	115	109	104	104	100	100	100	100
Sous pression horizontale[a]	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Sous pression verticale[b]	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Thixomoulage[c]	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Armature du dossier	50	500	1 000	2 000	3 000	5 000	7 500	10 000	15 000
Au sable	170	158	156	155	155	155	155	155	155
Permanent	78	66	64	64	61	61	61	61	61
Sous pression horizontale[a]	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Sous pression verticale	65	41	41	41	41	41	41	41	41
Thixomoulage[c]	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Total – siège double[d]	25	250	500	1 000	1 500	2 500	3 750	5 000	7 500
Au sable	650	607	591	584	584	584	584	584	584
Permanent	285	248	238	233	227	222	222	222	222
Sous pression horizontale[a]	156	156	156	156	156	156	156	156	156
SPH + SPV[a,e]	195	148	148	148	148	148	148	148	148
SPH + Thixo[a,f]	106	106	106	106	106	106	106	106	106

[a] : Les fournisseurs des procédés destinés à des grands volumes ont préféré déterminer un prix unitaire calculé à partir du volume moyen annuel sur les huit premières années de production.

[b] : Presses ayant une capacité suffisante en développement.

[c] : Aucune presse de capacité suffisante sur le marché.

[d] : Un siège double est composé d'une structure de coussin et de deux structures de dossiers.

[e] : Coussin monocoque fabriqué par moulage sous pression conventionnel (horizontale) et armatures des dossiers par moulage sous pression à injection verticale.

[f] : Coussin monocoque fabriqué par moulage sous pression conventionnel (horizontale) et armatures des dossiers par thixomoulage.

Tableau 23. Coût de production des pièces selon le procédé de fabrication

Procédé de moulage	Proto	An 1	An 2	An 3	An 4	An 5	An 6	An 7	An 8
	Évolution des coûts unitaires ($) selon le volume annuel produit								
Armature du coussin monocoque	**25**	**250**	**500**	**1 000**	**1 500**	**2 500**	**3 750**	**5 000**	**7 500**
Au sable	310	290	278	274	272	272	272	272	272
Permanent	128	115	109	104	104	100	100	100	100
Sous pression horizontale[a]	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Sous pression verticale[b]	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Thixomoulage[c]	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Armature du dossier	**50**	**500**	**1 000**	**2 000**	**3 000**	**5 000**	**7 500**	**10 000**	**15 000**
Au sable	170	158	156	155	155	155	155	155	155
Permanent	78	66	64	64	61	61	61	61	61
Sous pression horizontale[a]	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Sous pression verticale	65	41	41	41	41	41	41	41	41
Thixomoulage[a]	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Total – siège double[d]	**25**	**250**	**500**	**1 000**	**1 500**	**2 500**	**3 750**	**5 000**	**7 500**
Au sable	650	607	591	584	584	584	584	584	584
Permanent	285	248	238	233	227	222	222	222	222
Sous pression horizontale[a]	156	156	156	156	156	156	156	156	156
SPH + SPV [a,e]	195	148	148	148	148	148	148	148	148
SPH + Thixo [a,f]	106	106	106	106	106	106	106	106	106

[a] : Les fournisseurs des procédés destinés à des grands volumes ont préféré déterminer un prix unitaire calculé à partir du volume moyen annuel sur les huit premières années de production.

[b] : Presses ayant une capacité suffisante en développement.

[c] : Aucune presse de capacité suffisante sur le marché.

[d] : Un siège double est composé d'une structure de coussin et de deux structures de dossiers.

[e] : Coussin monocoque fabriqué par moulage sous pression conventionnel (horizontale) et armatures des dossiers par moulage sous pression à injection verticale.

[f] : Coussin monocoque fabriqué par moulage sous pression conventionnel (horizontale) et armatures des dossiers par thixomoulage.

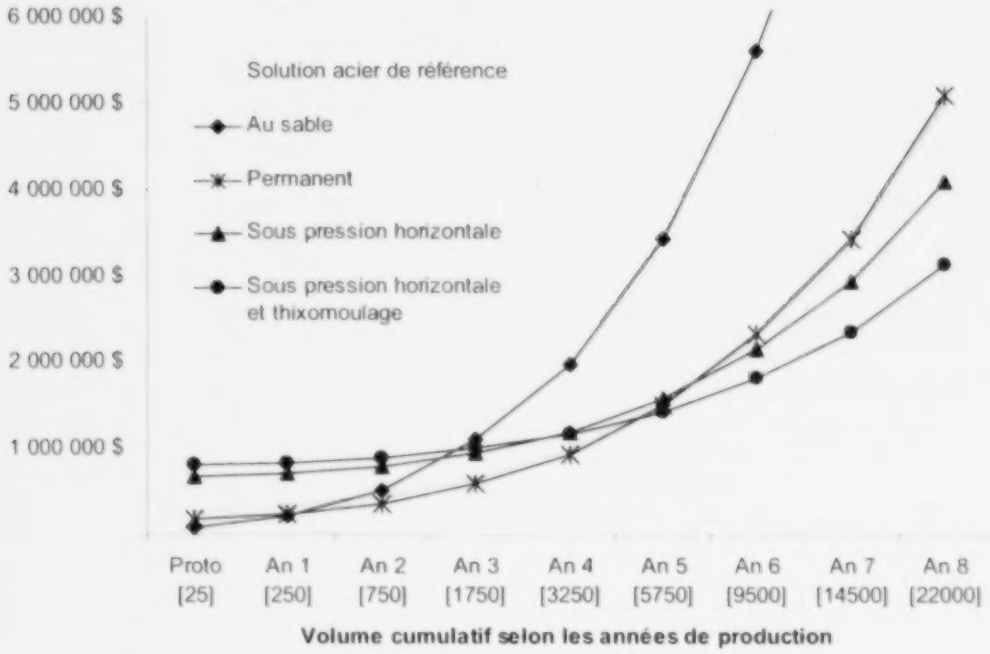


Figure 23. Évolution du coût cumulatif pour la production de sièges doubles (outillage et production) selon le procédé de moulage retenu

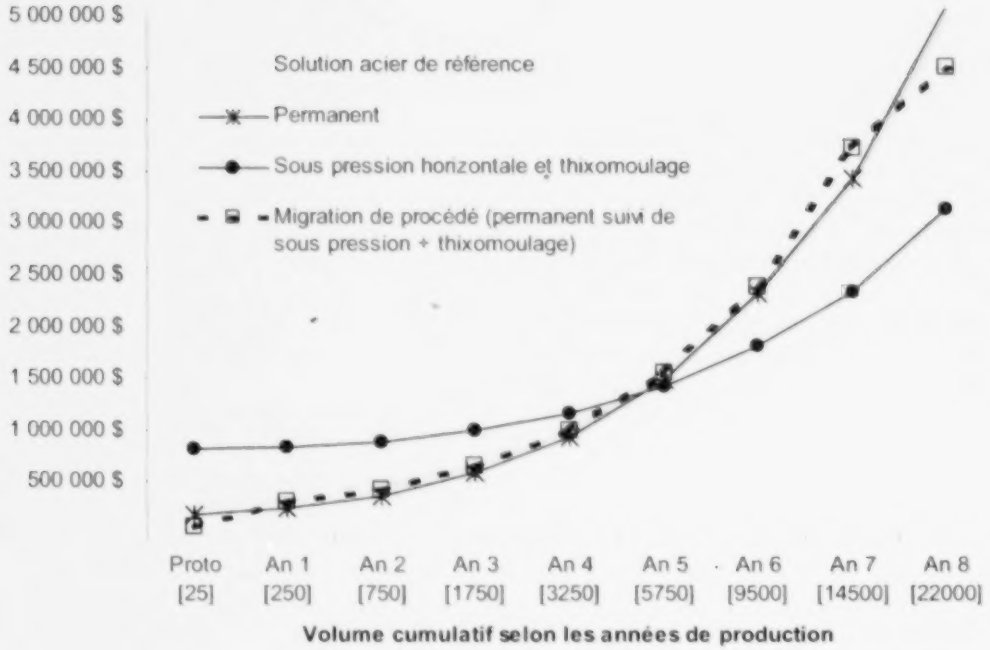


Figure 24. Évolution du coût cumulatif pour la production de sièges doubles (outillage et production) selon le scénario retenu

La figure 23 illustre l'évolution, année après année, du coût total cumulé (outillage initial et coût total des pièces produites) selon les hypothèses de ventes du tableau 21 et pour chacune des solutions. Dans un contexte d'analyse financière où l'on considère la valeur de l'argent dans le temps, ce graphique permet d'identifier le procédé mobilisant le moins de capitaux au fil des ans.

L'analyse de ces données nous permet de constater que :

- pour la réalisation des prototypes et la phase de validation, le moulage au sable est le procédé requérant le moins d'investissement;
- jusqu'à un volume cumulé d'environ 5 000 à 5 250 sièges doubles, le procédé de moulage permanent présente les meilleurs coûts et minimise l'investissement;
- sur la base du coût total cumulé (outillage et coût de production), la solution en magnésium par moulage permanent mobilise moins de capitaux qu'une solution en acier conventionnelle, jusqu'à un volume totalisant entre 8 000 et 9 000 unités (bien que l'amortissement de l'outillage de la solution en acier se fasse sur une durée de vie beaucoup plus longue, son coût d'acquisition est plus élevé que pour le moulage permanent);
- dès que les volumes totaux produits dépassent les 5 250 unités, l'option combinant le procédé de moulage sous pression conventionnel pour l'armature du coussin monocoque et le procédé de thixomoulage pour les armatures des dossiers présente les meilleurs coûts; toutefois, cette option nécessite deux fournisseurs plutôt qu'un seul;
- l'option utilisant le moulage sous pression à injection verticale offre un coût inférieur au moulage sous pression conventionnel et constitue la seconde meilleure option pour les grands volumes; sachant que des presses de plus grandes capacités seront bientôt disponibles sur le marché, il serait intéressant d'évaluer alors une solution complète utilisant cette technologie.

Ainsi, on peut conclure que pour les six premières années de production (toujours selon les hypothèses de volumes du tableau 21), le procédé de moulage permanent est la meilleure option considérant l'incertitude sur les volumes. À partir de la septième année, si la demande continue sa croissance tel que prévue, une migration vers la solution combinant le moulage sous pression et le thixomoulage pourrait être envisagée afin de profiter de la compétitivité de ces procédés pour les volumes plus élevés. En fait, le volume prévu à compter de la sixième année (3 750 sièges doubles, soit quelque 150 autocars) est suffisant, s'il se maintient durant les années suivantes, pour justifier une migration vers les procédés de moulage sous pression.

La figure 24 illustre l'évolution du coût total cumulé selon ce scénario de migration au début de la septième année de production (prototypage à l'aide du moulage au sable, première phase de production au moulage permanent suivi d'une phase de production à long terme combinant le moulage sous pression et le thixomoulage). On y constate l'augmentation importante des coûts lors de l'introduction des procédés de moulage sous pression et de thixomoulage en raison du coût élevé des outillages, mais les gains importants cumulés sur le coût des pièces font en sorte que le coût total cumulé revient rapidement inférieur à celui de la solution de référence en acier dès l'année suivante, et devient aussi nettement inférieur à la courbe du moulage permanent. En d'autres mots, les coûts supplémentaires engendrés par la migration de procédé lors de la septième année sont entièrement absorbés un an après le changement. Ce scénario semble donc

être celui qui minimise les risques d'investissements tout en offrant le meilleur compromis sur le coût.

Les auteurs tiennent à souligner que le choix des procédés présentés ci-dessus s'est fait simplement sur la base de l'hypothèse de départ : à savoir identifier et valider l'approche la plus économique pour la fabrication de sièges en magnésium. Cette analyse de cas met clairement en évidence que le procédé de moulage permanent est celui qui assurera la compétitivité du magnésium par rapport à une solution en acier. Ensuite, dès que les volumes annuels atteindront 3 750 sièges doubles par année, il sera alors pertinent pour le manufacturier de siège de migrer vers le moulage sous-pression ou le thixomoulage selon ses propres critères économiques et selon les évolutions que ces technologies connaîtront au cours des années à venir.

4.4.8 Comparaison des coûts avec la solution en acier

Sur la base des données précédentes, il est possible d'estimer un coût net unitaire pour un siège double en magnésium et de comparer ce coût avec la solution équivalente en acier tel qu'utilisée couramment par l'industrie.

Afin d'obtenir une comparaison qui soit significative, on doit faire les hypothèses suivantes :

- les coûts d'outillage et de fabrication des pièces sont inclus dans le calcul;
- le coût de l'outillage est amorti sur sa durée vie utile (en unités produites);
- la réduction du coût d'assemblage d'une solution en magnésium par rapport à la solution en acier est incluse dans le calcul;
- le coût des accoudoirs et de l'armature de soutien de ces accoudoirs est inclus dans le calcul (pour la solution magnésium, les accoudoirs sont en aluminium et les armatures de soutien dont déjà incorporées à même l'armature du coussin monocoque);
- pour les fins de nos calculs, les coûts d'usinage ne sont toutefois pas inclus.

La figure 25 présente l'évolution du coût net unitaire pour un siège double complet pour le moulage permanent comme solution à long terme et le scénario de migration décrit précédemment, tous deux relativement au coût de la solution de référence en acier. Pour l'option de moulage permanent comme solution à long terme, le coût d'outillage a été amorti sur sa durée de vie réelle, soit 70 000 unités. Dans le cas de l'option où il y a migration de procédé (ou du moins où l'on anticipe une migration de procédé), le coût de l'outillage pour le moulage permanent a été amorti sur les volumes totaux des six premières années, soit 9 500 unités, alors que l'amortissement des outillages pour le moulage sous pression et le thixomoulage se fait sur leur durée de vie complète, soit 50 000 unités.

L'analyse de la figure 25 nous permet de constater que les sièges en magnésium par moulage permanent (comme solution à long terme) représente un coût supplémentaire de 10 % à 15 % par rapport à la solution en acier pour de faibles quantités (1 000 sièges doubles et moins ou 40 autocars et moins) et se maintient à 4 % de surcoût pour des volumes plus élevés (2 500 sièges doubles ou 100 autocars et plus par année). Sur la période de huit années, le coût unitaire moyen représente un surcoût d'environ 5 % par rapport au coût de la solution de référence en acier. En termes de coût par kilogramme

épargné (métrique scuvent utilisé dans les analyses de réduction de poids), cela représente un surcoût de 2,33 $/kg pour des volumes de 250 sièges par année, à un léger surcoût de 0,66 $/kg pour des volumes plus élevés.

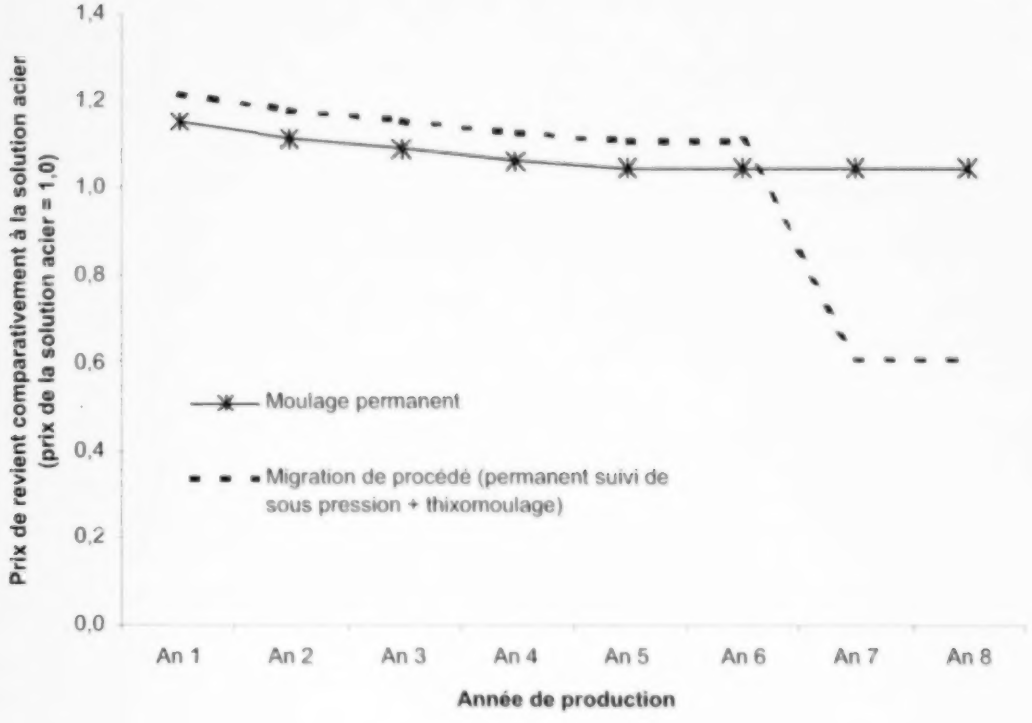


Figure 25. Évolution du coût net unitaire d'un siège double complet comparativement à la solution de référence en acier

Dans le cas du scénario où l'on privilégie une migration de procédé en cours de route (moulage permanent suivi de moulage sous pression et thixo), l'amortissement de l'outillage du moulage permanent se fait sur une plus petite quantité affectant ainsi le prix de revient. Au cours des six années de production avec ce procédé, le coût total unitaire représente un surcoût variant d'environ 20 % à 10 %. Si on prend la moyenne du coût des pièces pour ces six années de production par moulage permanent, on obtient un surcoût d'environ 12 % par rapport à la solution en acier. Mais là où les choses deviennent plus intéressantes, c'est après l'introduction des procédés de moulage sous pression. En effet, l'option combinant le moulage sous pression et le thixomoulage permet d'obtenir une réduction de coût de près de 40 % par rapport à la solution en acier.

Si on parle en termes de coût par kilogramme épargné dans ce scénario, cela représente un surcoût de 3,40 $/kg épargné par le moulage permanent pour des volumes annuels de 250 sièges doubles (10 autocars), à une économie de plus de 6,00 $/kg avec les procédés de moulage sous pression.

À compter d'un volume 2 500 unités par année (100 autocars), le surcoût devient inférieur à la limite de 1,75 $/kg épargné mentionnée par certains manufacturiers d'autocars.

4.4.9 Impact sur le coût du cycle de vie

Dans le contexte où tous les avantages d'un siège passager en magnésium doivent être évalués, il est important de quantifier les principaux bénéfices reliés à l'allégement tel qu'identifié précédemment à la section 4.2.

Considérant que le devis soumis aux fournisseurs était basé sur un concept optimisé pour le moulage sous pression, il est fort probable que les épaisseurs des parois des pièces produites avec le procédé de moulage permanent devront être légèrement augmentées afin de tenir compte des limitations du procédé. Ceci pourrait avoir un léger impact de l'ordre de 10 à 15 % sur l'économie de poids obtenue avec cette solution.

À partir de données de Transports Canada, les réductions des quatre principaux éléments de coût du cycle de vie ont été évaluées.

Tableau 24. Impacts sur le coût du cycle de vie

Élément de coût du cycle de vie	Diminution du coût pour un allégement de 375 kg/autocar	
	Annuel/autocar	Durée de vie (15 ans) /autocar
Essence	295 $	4 425 $
Usure de freins et des pneus	110 $	1 650 $
Infrastructure routière	264 $	3 960 $
Émissions polluantes	176 $	2 640 $
Total	**845 $**	**12 675 $**

Le tableau 24 présente une synthèse des impacts économiques suivant la réduction de poids des autocars due à des sièges en magnésium. Les principales hypothèses ayant servies à ces calculs sont :

- kilométrage annuel estimé par autocar de 140 625 km;
- consommation de carburant de 2,5 km/litre;
- coût du litre de carburant de 0,70 $/litre;
- réduction du poids de 1 000 kg engendre une réduction de consommation en carburant de 2 %;
- économie sur l'usure des freins et des pneus évaluée à 0,0025 $/km par autobus pour une réduction de 1 200 kg;
- économie sur les dommages aux infrastructures routières évaluée à 0,006 $/km par autobus pour une réduction de 1 200 kg;

- réduction des dommages à l'environnement due aux émissions polluantes évaluée à 0,004 $/km par autobus pour une réduction de 1 200 kg;

Bien que pouvant sembler relativement minimes, les économies directes sur le coût de cycle de vie pour l'opérateur d'autocars (coût d'essence et usure des freins et des pneus totalisant 405 $ par an par autocar) permettent de récupérer en environ de deux ans le surcoût par kilogramme d'une solution en magnésium, dans le cas d'un volume de production équivalent à 20 autocars par année (soit 875 $ par autocar) et en moins d'un an pour des volumes équivalent à 100 autocars et plus par année (250 $ par autocar). Ainsi, pour l'opérateur, un autocar équipé de sièges en magnésium permet d'économiser directement quelque 6 000 $ durant la durée de vie du véhicule. Pour de grands opérateurs ayant des flottes de plusieurs centaines d'autocars, cela se transforme tout de même en plusieurs millions de dollars de profits supplémentaires.

Au niveau de la réduction d'émission de CO_2, l'impact de la réduction de poids de 375 kg/autocar est relativement faible. On parle d'environ 1,14 tonne annuellement, soit quelque 17 tonnes par autocar pour sa durée de vie estimé à 15 ans. Néanmoins, cette réduction de poids peut s'inscrire en complémentarité d'autres solutions techniques d'allégement, contribuant aussi à la réduction des émissions de CO_2.

4.4.10 Coûts d'une solution hybride aluminium et magnésium

Pour la première phase de production, il est intéressant de comparer les coûts d'une solution exclusivement en magnésium par moulage permanent à une solution hybride mariant aluminium et magnésium. Le tableau 25 compare le coût de fabrication des pièces de la solution magnésium par rapport à ceux de deux solutions hybrides différentes (dans tous les cas, avec le procédé de moulage permanent).

Les prix de la première solution hybride sont obtenus en calculant le coût (fabrication des pièces uniquement) d'une base monocoque en magnésium combinée à deux dossiers en aluminium tandis que la deuxième solution hybride est obtenue en combinant une base monocoque en aluminium à deux dossiers en magnésium. Le poids de ces deux solutions hybrides sont respectivement de 8,7 et 9,8 kg comparativement à 5,9 kg pour la solution entièrement en magnésium. À partir de l'hypothèse qu'un siège passager en magnésium permet une économie de poids de 15 kg par siège double, les économies seraient plutôt de 11,1 et 12,2 kg pour les deux solutions hybrides décrites.

Les poids des pièces en aluminium ont été estimés en collaboration avec le mouleur et à partir du concept des pièces en magnésium auquel s'est ajouté un facteur de surdimensionnement des parois tel que requis avec le procédé de moulage permanent de l'aluminium. Le poids du dossier en aluminium est estimé à 2,8 kg alors que le poids de l'armature du siège est estimé à environ 7,0 kg.

On remarque à l'étude du tableau 25 que la solution entièrement en magnésium est, sans surprise, la plus coûteuse, mais offre la réduction de poids la plus importante; alors que l'option utilisant une base monocoque en magnésium et les dossiers en aluminium est la moins coûteuse avec une économie de coût de 29 %, mais pour un poids 66 % plus élevé que la solution entièrement en magnésium.

Tableau 25. Comparaison des coûts d'une solution par moulage permanent entièrement en magnésium et de solutions hybrides utilisant l'aluminium

	An 1	An 2	An 3	An 4	An 5	An 6	An 7	An 8
	Évolution des coûts unitaires ($) selon le volume annuel produit							
Total – siège double	250	500	1 000	1 500	2 500	3 750	5 000	7 500
Entièrement Mg (5,9 kg)	248	238	233	227	222	222	222	222
Base Mg et dossiers Al (8,7 kg)	192	172	167	161	161	157	157	157
Base Al et dossiers Mg (9,8 kg)	253	211	208	208	201	201	201	201

Si on compare les coûts avec la solution de référence en acier, il est intéressant de souligner que les deux solutions hybrides offrent une économie de coût, en plus d'offrir une économie de poids. Plus spécifiquement, pour la solution où la base monocoque est en aluminium, on obtient une économie par rapport à la solution en acier de l'ordre de 1 % à 5 % selon les volumes et la période d'amortissement des outillages. Pour la solution où les dossiers sont en aluminium, on obtient une économie variant entre 17 % et 24 %.

En terme de coût du cycle de vie, l'économie d'une solution allégée passe de quelque 12 000 $ sur la durée de vie d'un autocar pour une solution entièrement en magnésium, à quelque 10 000 $ ou 9 000 $ pour les deux solutions hybrides. Pour les émissions de CO_2, la réduction passerait de 17 tonnes sur la durée de vie d'un autocar dans le cas d'une solution entièrement en magnésium à quelque 13 ou 14 tonnes pour les solutions hybrides.

En conclusion, l'option hybride mariant le magnésium et l'aluminium est définitivement une option plus avantageuse que la solution conventionnelle en acier puisque qu'elle offre à la fois une réduction significative des coûts et une réduction de poids. Le choix le plus intéressant est celui où la base (la pièce la plus grosse) est en magnésium et les dossiers en aluminium, permettant ainsi d'optimiser le poids et le coût. Toutefois, il est important de rappeler qu'une solution entièrement en magnésium selon le scénario combinant le moulage sous pression et le thixomoulage représente, pour des volumes suffisants, une économie de coût encore plus importante que l'option hybride par moulage permanent et une plus grande réduction de poids.

Tableau 25. Comparaison des coûts d'une solution par moulage permanent entièrement en magnésium et de solutions hybrides utilisant l'aluminium

	An 1	An 2	An 3	An 4	An 5	An 6	An 7	An 8
	Évolution des coûts unitaires ($) selon le volume annuel produit							
Total – siège double	250	500	1 000	1 500	2 500	3 750	5 000	7 500
Entièrement Mg (5,9 kg)	248	238	233	227	222	222	222	222
Base Mg et dossiers Al (8,7 kg)	192	172	167	161	161	157	157	157
Base Al et dossiers Mg (9,8 kg)	253	211	208	208	201	201	201	201

Si on compare les coûts avec la solution de référence en acier, il est intéressant de souligner que les deux solutions hybrides offrent une économie de coût, en plus d'offrir une économie de poids. Plus spécifiquement, pour la solution où la base monocoque est en aluminium, on obtient une économie par rapport à la solution en acier de l'ordre de 1 % à 5 % selon les volumes et la période d'amortissement des outillages. Pour la solution où les dossiers sont en aluminium, on obtient une économie variant entre 17 % et 24 %.

En terme de coût du cycle de vie, l'économie d'une solution allégée passe de quelque 12 000 $ sur la durée de vie d'un autocar pour une solution entièrement en magnésium, à quelque 10 000 $ ou 9 000 $ pour les deux solutions hybrides. Pour les émissions de CO_2, la réduction passerait de 17 tonnes sur la durée de vie d'un autocar dans le cas d'une solution entièrement en magnésium à quelque 13 ou 14 tonnes pour les solutions hybrides.

En conclusion, l'option hybride mariant le magnésium et l'aluminium est définitivement une option plus avantageuse que la solution conventionnelle en acier puisque qu'elle offre à la fois une réduction significative des coûts et une réduction de poids. Le choix le plus intéressant est celui où la base (la pièce la plus grosse) est en magnésium et les dossiers en aluminium, permettant ainsi d'optimiser le poids et le coût. Toutefois, il est important de rappeler qu'une solution entièrement en magnésium selon le scénario combinant le moulage sous pression et le thixomoulage représente, pour des volumes suffisants, une économie de coût encore plus importante que l'option hybride par moulage permanent et une plus grande réduction de poids.

5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

5.1 SYNTHÈSE DES FAITS

Cette étude a permis d'analyser les principales interrogations typiquement soulevées par l'industrie concernant le développement d'un siège en magnésium. Rappelons que le concept étudié permettrait une réduction de poids de plus de 375 kg par autocar.

Risques d'inflammabilité : Il a été démontré au chapitre 3 que le magnésium passe avec une marge de sécurité élevée les principaux tests requis tant par l'industrie des autocars ainsi que celle des trains en Amérique du Nord.

Propriétés mécaniques : De nombreuses utilisations du magnésium pour des applications structurales dans l'industrie automobile, incluant des applications de sièges, ont été présentées aux chapitres 2 et 3. Il a aussi été démontré au chapitre 3 que les normes de l'industrie automobile sont plus exigeantes que les normes les plus sévères de l'industrie des autocars. Ceci nous permet de conclure qu'il n'y a pas de problème majeur à concevoir un siège passager respectant les normes de l'industrie.

Par ailleurs, il est aussi important de souligner la possibilité d'un confort accru des passagers grâce aux propriétés du magnésium lui permettant de mieux absorber l'énergie et les vibrations comparativement à l'acier ou l'aluminium.

Viabilité économique : L'étude de cas présentée au chapitre 4 a permis d'analyser les coûts et les limitations de différents procédés de moulage du magnésium pour la réalisation des pièces du siège.

- Il a été démontré que pour la production commerciale des sièges, jusqu'à un volume cumulé d'environ 5 000 à 5 250 sièges doubles, le procédé de moulage permanent présente les meilleurs coûts et le plus faible investissement.
- Dès que les volumes totaux produits dépassent les 5 250 unités, l'option combinant le procédé de moulage sous pression conventionnel pour l'armature du coussin monocoque et le procédé de thixomoulage pour les armatures des dossiers présente les meilleurs coûts.
- L'option utilisant le moulage sous pression à injection verticale pourrait représenter une alternative plus économique au moulage sous pression conventionnel. Des presses de capacité suffisante devraient apparaître bientôt sur le marché.

Si on analyse le bilan des coûts d'outillage, des coûts de production et des économies de coûts au niveau de l'assemblage, on constate que :

- la solution en magnésium par moulage permanent, à partir d'environ 2 500 sièges doubles (100 autocars) représente un surcoût de 4 %, comparativement à un siège typique en acier pour une réduction de poids de l'ordre de 20 % à 35 %;

- à compter d'environ 2 500 sièges doubles (100 autocars) par année, le surcoût par kilogramme épargné est inférieur à la limite généralement jugée acceptable par certains constructeurs d'autocars de 1,75 $.
- la solution en magnésium permet à l'opérateur d'autocars d'économiser directement quelque 400 $ par année par autocar en frais d'essence et d'usure des freins et des pneus; par ailleurs, ces gains permettent de récupérer en environ de deux ans le surcoût engendré pour des volumes de production de 20 autocars, et en moins d'un an pour des volumes de 100 autocars et plus par année;
- une solution hybride combinant le magnésium et l'aluminium constitue déjà une alternative plus avantageuse aux sièges en acier, offrant à la fois une économie de coût et une économie de poids;
- pour des volumes annuels correspondant à 150 autocars (3 750 sièges doubles), les coûts d'une solution magnésium combinant moulage sous pression et thixomoulage permettraient une économie de près de 40 % par rapport à la solution actuelle en acier;

5.2 CONCLUSION

À la lumière des faits présentés précédemment, il apparaît qu'une solution de sièges plus légers serait à la fois possible techniquement et viable économiquement.

Du côté technique, cette étude a permis de mettre en lumière que :

- au niveau de l'inflammabilité, le magnésium rencontre toutes les normes imposées par l'industrie automobile, celle des autobus et celle des trains;
- la capacité du magnésium d'absorber l'énergie lors de collision, si jumelée à une excellente conception du siège en fonction du procédé de moulage sélectionné pour la production, pourrait permettre dans certains cas d'améliorer la sécurité des occupants projetés sur le dossier du siège avant;
- la capacité du magnésium d'absorption des vibrations devrait permettre une réduction des vibrations transmises aux passagers et assurer ainsi un plus grand confort lors de longs voyages.

La décision finale quant au choix des matériaux (magnésium et/ou aluminium) peut varier selon les objectifs visés par le manufacturier de sièges, le manufacturier d'autocars ou encore l'acheteur final. Cependant, dans le choix de ces matériaux, il sera important de considérer que :

- le développement d'un siège en magnésium permet une réduction de poids d'environ 375 kg par autocar comparativement à moins de 200 kg pour un concept en aluminium;
- plus la réduction de poids sera importante, plus il sera facile pour les opérateurs d'augmenter la charge payante des autocars ou encore de respecter les normes des poids pour les différents essieux, de réduire la consommation de carburant et l'usure de composants tels les freins et les pneus;
- l'utilisation du magnésium permettrait la fabrication de siège ergonomique à paroi plus mince que ne le permettrait l'aluminium;

- la capacité d'absorption des vibrations du magnésium est un avantage non négligeable par rapport à l'aluminium;
- plus la réduction de poids est élevée, plus les émissions de gaz à effet de serre et l'usure des infrastructures routières seront réduites.

Si les objectifs visés ne sont que purement économiques, la solution complètement en aluminium ou une solution hybride combinant aluminium et magnésium sont des choix avantageux. Cependant, ces choix comportent aussi certains inconvénients qu'il faut signaler :

- Le procédé de moulage permanent avec les alliages d'aluminium impose des épaisseurs de parois importantes. Sachant que la densité de l'aluminium est au départ 33 % plus élevée que celle du magnésium, une pièce en aluminium sera donc typiquement deux fois plus lourde que la pièce magnésium considérant l'épaisseur des parois. À titre indicatif, le poids de l'armature du coussin en aluminium est évalué à plus de 7,0 kg alors que le poids de la version magnésium est de 3,1 kg.
- Les commentaires recueillis des opérateurs de flottes d'autocars démontrent qu'ils sont à la recherche de sièges confortables sur de longues distances ainsi que peu bruyants, peu importe l'usure des composants. Dans ce contexte, les propriétés du magnésium pour l'absorption de l'énergie et des vibrations peuvent devenir un facteur important. Certains tests supplémentaires mériteraient d'être effectués afin d'en mesurer l'impact réel.
- Les opérateurs désirent minimiser le plus possible l'encombrement des sièges afin de laisser plus de place aux passagers assis. Afin d'atteindre cet objectif, la plus grande fluidité du magnésium peut procurer un avantage significatif puisqu'il permet de mouler des formes plus complexes que ne le permet l'aluminium. Cette fluidité permet aussi de réduire le poids de chacun des composants grâce à des parois plus minces.

Néanmoins, si les objectifs visés consistent davantage dans la réduction de poids tout en conservant un coût compétitif, l'option combinant une base en magnésium et des dossiers en aluminium fabriqués par moulage permanent est une avenue à privilégier pour débuter. Lorsque les volumes atteindront un niveau suffisant, une migration vers une solution entièrement en magnésium par moulage sous-pression et thixomoulage pourrait être envisagée, augmentant ainsi l'économie de poids et réduisant davantage le coût.

Rappelons que l'engagement d'un seul manufacturier d'autocars à migrer vers une solution hybride magnésium-aluminium est suffisant pour obtenir dès le début des économies de coût par rapport à la solution conventionnelle en acier. Mais il est aussi important de souligner que l'industrie dans son ensemble aurait intérêt à favoriser une migration massive vers une solution entièrement en magnésium (moulage sous pression et thixomoulage), ce qui permettrait de gagner sur toute la ligne (coût, poids et confort).

5.3 RECOMMANDATIONS

Aspects commerciaux

En tenant compte des principaux faits exposés dans cette étude, les auteurs font les recommandations suivantes concernant le potentiel de commercialisation :

- Le développement d'un siège plus léger, soit en aluminium ou sous forme hybride combinant le magnésium et l'aluminium est économiquement avantageux dès maintenant et devrait constituer le point de départ d'une nouvelle gamme de produits sur le marché en remplacement des sièges en acier.
- Pour favoriser l'atteinte rapide des volumes requis pour maximiser l'intérêt d'une solution entièrement en magnésium, la commercialisation devrait viser non pas uniquement le marché canado-américain, mais, dans le contexte de l'ALÉNA, inclure aussi le marché mexicain. Le développement de ce marché pourrait notamment se faire par le biais d'alliances stratégiques.

  Par ailleurs, sachant que les joueurs présents sur le marché mexicain sont souvent actifs sur marché brésilien et que plusieurs constructeurs de ces deux pays sont d'origine européenne, la commercialisation d'un tel siège peut rapidement devenir internationale. Des groupes tels que Volvo Bus (Prévost Car au Canada et Volvo Bus au Mexique), DaimlerChrysler (Setra aux États-Unis et en Europe, Mercedes au Mexique), Irizar (Mexique, Amérique du Sud, Europe) peuvent être ciblés pour favoriser une adoption et une croissance rapide.
- Considérant le potentiel international d'un siège en magnésium et considérant les capacités mécaniques des alliages de magnésium, il serait avantageux de considérer une adaptation du siège selon les normes européennes en intégrant notamment une ceinture de sécurité à trois points.
- Connaissant l'intérêt de certains manufacturiers de trains à grande vitesse, il serait possible d'envisager une conception de sièges qui puisse aussi répondre aux besoins de cette industrie, ce qui permettrait d'accoître les volumes de production et d'ainsi réduire davantage le coût de revient.

Aspects techniques

La présente étude avait pour objectif de faire la lumière sur la faisabilité technico-économique d'un siège en magnésium. Maintenant, afin d'aller plus loin dans le développement et la commercialisation d'un tel siège, certains points techniques sont à approfondir. À ce titre, les auteurs font les recommandations suivantes :

- Peaufiner le concept de siège proposé dans l'étude de cas (et éventuellement l'adapter pour une approche hybride) et faire les analyses structurales qui s'imposent avec la norme européenne CEE 80 afin de valider la réduction de poids possible avec un siège passager en magnésium et/ou aluminium répondant à cette norme.
- Considérant les occasions de marchés, incorporer dans le nouveau concept les points d'attache d'une ceinture de sécurité à trois points.

- Poursuivre le développement du concept avancé en étroite collaboration avec des experts des technologies de moulage sélectionnées afin d'optimiser la conception du siège, de tirer profit au maximum des propriétés des alliages sélectionnés du magnésium et de déterminer avec précision les économies de poids réalisables.
- Optimiser la conception afin de minimiser l'encombrement des différents composants du siège et améliorer l'ergonomie afin d'assurer un confort accru aux passagers sur de longues distances.
- Afin d'optimiser davantage le concept proposé, procéder à une analyse comparative et quantitative de l'alliage de magnésium AM60B typiquement utilisé par l'industrie automobile et des nouveaux alliages présentant des propriétés améliorées, notamment ceux de Noranda et Dead Sea Magnesium.
- Réaliser des essais de collision, de corrosion sur les pièces structurales exposées s'il y a lieu ainsi que tout autre essai mécanique permettant de valider le concept final.
- Réaliser une étude de cas réelle avec des prototypes de sièges en magnésium ou hybrides assemblés sur un autocar mis en circulation.

OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

1. Smith, Scott, Brewer, John, Douglass, Lee, *Study & Report to Congress: Applicability of Maximum Axle Weight Limitations to Over-the-Road and Public Transit Buses, Pursuant to Senate Report No. 107-38*, December 2003.
2. Centre des matériaux composites de Saint-Jérôme, *Programme de réduction du poids des autobus urbains : Phase 1*, Centre de développement des transports, Transports Canada, Montréal, Mars 1999, TP 13423F.
3. Martec Limited, *Intercity Bus Weight Reduction Program – Phase 1*, Transportation Development Centre, Montreal, January 2000, TP 13560E.
4. Bradley, et al., *Technology Roadmap for the 21st Century Truck Program*, December 2000, 21CT-001.
5. Jack, D., Gibbins, E., *The World Bus & Coach Manufacturing Industry 2002*, 2nd edition, Truck & Bus Builder Reports Ltd, Somerset (England), ISBN 0-954 1408-1-8.
6. Rona Kinetics & Associates, *Évaluation de la protection des occupants dans les autobus*, Transports Canada, Juin 2002, TP 14006F.
7. Transports Canada, *Consultations sur la sécurité des autobus et des autocars : rapport final*, 2001, TP 13713F.
8. Fantetti, N., Szczesniak, M., *High Ductility Seatback Structure*, SAE International Congress, Article 940404, March 1994.
9. Baril, E., Labelle, P., Fischersworring-Bunk, A., *AJ (Mg-Al-Sr) Alloy System Used for New Engine Block*, SAE International Congress, Article 2004-01-0659, March 2004.
10. Pekguleryuz, M., Labelle, P., Baril, E., Argo, D., *Magnesium Die-Casting Alloy AJ62X With Superior Creep Resistance, Ductility and Die Castability*, SAE International Congress, Article 2003-01-0190, Session: Magnesium Technologies (Part 1 & 2), March 2003.
11. Brown, R.F., *Magnesium Wrought and Fabricated Products Yesterday, Today and Tomorrow*, TMS Annual Meeting, Seattle, February 2002.
12. Renaud, J., Watanabe, K., *Design Considerations for Magnesium Components*, SAE International Congress, Article 930416, March 1993.
13. Druschitz, A.P., Showalter, E.R., McNeill, J.B., White, D.L., *Evaluation of Structural and High-Temperature Magnesium Alloys*, SAE International Congress, Technical Paper 2002-01-0080, March 2002.
14. Lebeau, S.E., Walukas, M.W., Decker, R.F., Labelle, P., Moore, A.R., Jones, J.W., *Evaluation of Thixomolded Magnesium Alloy Components for Structural Automotive Applications*, SAE International Congress, Article 2004-01-0137, March 2004.

15. Helms, H., Lambrecht, U., Höpfner, U., *Energy Saving by Light-Weighting*, Energy and Environmental Research Institute, Study commissioned by the International Aluminium Institute (IAI), Heidelberg, January 2003.

ANNEXE A – PERSONNES CONTACTÉES

Liste des personnes-ressources contactées lors de l'étude

Acadian Lines Ltd
Mike Melanson
Directeur des opérations
961 Main Street
Moncton, NB, E1C 1G8
Tél. : 1-800-567-5151

Amaya-Astron Seating Group
Rosario Arellano Lopez
Fulton No 6 Industrial San Nicolas 54030
Tlalnepantla, Edo de Mexico
Tél. : +52 (55) 53-11-50-00

American Seating Company
Jerry Daly
401 American Seating Ctr.
Grand Rapids, MI 49504-4455
Tél. : (616) 723-2622

Autocars Murray Hill
(Groupe Gaudreault)
Serge Simard
130, rue Landreville
Repentigny, QC, J6A 8C2
Tél. : (450) 585-1210

Autocars Orléans Express Inc.
Louis Gagné
Vice-président Exploitation
320, rue Abraham-Martin
Québec, QC, G1K 8N2
Tél. : (418) 525-3012

C.E. White Company
Steve Frazee
Directeur des produits commerciaux
P.O. Box 308
New Washington, OH 44854-0308
Tél. : (419) 492-2157

Centre de développement des transports
(Transports Canada)
Claude Guérette
Agent principal de développement
800, boul. René-Lévesque Ouest
Bureau 600
Montréal, QC, H3B 1X9
Tél. : (514) 283-0049

Charter Bus Lines of British Columbia
Wayne Eggen
8730 River Road
Delta, BC, V4G 1B5
Tél. : (604) 662-7575

Compin Intercity Group
Hubert Thouroulde
Ingénieur en chef - Produits Intercité
Zelzatestraat 61
B-9960 Assenede
Belgique
Tél. : +32 9.218.53.51

Fabrication Powercast Inc.
Ravi Gupta
Ventes et marketing
540, boul. Industriel
Saint-Eustache, QC, J7R 5V3
Tél. : (450) 473-1517

Genistar
Gilles Desharnais
Boucherville, QC
Tél. : (514) 231-4860

Greyhound Bus Lines
Dave Dick
Directeur de l'entretien et des flottes
16th Street, S.W.
Calgary, AB, T3C 3V7
Tél. : (403) 260-0877

Hydro Magnesium
Mathieu Vézina
Directeur des ventes
7000, boul. Raoul-Duchesne
Bécancourt, QC, G9H 2V3
Tél. : (819) 294-4538

Magnesium Elektron North America
Richard D. Delorme
Directeur technique
1001 College Street
P.O. Box 258
Madison, IL, 62060
Tél. : (618) 452-5190, poste 362

Magnesium Elektron North America
Ken Clark
Technical Marketing Manager
100 E. Taylor, Suite 4,
Creston, IA 50801
Tél. : (641) 782-7200

Magparts
Robert C. Bates
Sales Engineer
1545 W. Roosevelt Street
Azusa, CA, 91702-3241
Tél. : (626) 945-0817

Meridian Technologies
Len Miller
Vice-président
25 McNab
Strathroy, ON, N7G 4P4
Tél. : (519) 246-9600, poste 205

Meridian Technologies
Tony Lawson
Directeur de l'ingénierie avancée - Europe
Orchard Way, Calladine Park
Sutton in Ashfield, Nottinghamshire
NG17 1JU, Royaume Uni
Tél. : +44 (0) 1623 444937

Meridian Technologies
John R. Izydorczyk
Business Development Manager
352 North Main Street, Suite 5
Plymouth, MI 48170
Tél. : (517) 420-1057

Meridian Technologies
Gerry Wang
Expert Core Technology
25 MacNab
Strathroy, ON, N7G 4H6
Tél. : (519) 246-9600, poste 143

Motor Coach Industries (MCI)
Brent Danielson
Directeur de l'ingénierie
1475 Clarence Avenue
Winnipeg, MB, R3T 1T5
Tél. : (204) 284-5360

Multina Inc.
Éric Belval
Directeur ingénierie
1275, rue Janelle
Drummondville, QC, J2C 3E4
Tél. : (819) 474-2418

Multina Inc.
François Giguère
Ingénieur de développement produits
1275, rue Janelle
Drummondville, QC, J2C 3E4
Tél. : (819) 474-2418, poste 5320

Noranda Inc.
Pierre Labelle
Ingénieur en chef, Développement de produits, Zn et Mg
2250, boul. Alfred-Nobel, bureau 300
Saint-Laurent, QC, H4S 2C9
Tél. : (514) 745-9351

Nova Bus
Serge Bilodeau
Directeur technique
1000, boul. Industriel
Saint-Eustache, QC, J7R 5A5
Tél. : (450) 974-6043

Pacific Western Transportation Ltd
Mike Colborne
Directeur des opérations
1857 Centre Ave SE
Calgary, AB, T2E 6L3
Tél. : (403) 248-4300

Phillips Metals Corporation
Bill Welch
3449 Sky Park Boulevard
Eau Claire, WI 54701
Tél. : (715) 831-5400, poste 4757

Prévost Car
Alain Dulac
Directeur de l'ingénierie
35, boul. Gagnon
Sainte-Claire, QC, G0R 2V0
Tél. : (418) 883-2888, poste 6594

Prévost Car
Raymond Blackburn
Expert-Produit Ingénierie
35 Boul. Gagnon
Sainte-Claire, QC, G0R 2V0
Tél. : (418) 883-2888, poste 6629

Rotem Industrie Ltd
Adi Ben-Artzy
Chef du groupe, Transformations du métal
P.O. Box 9046 Beer-Sheva
Israël, 84190
Tél. : 972 8 651 8739

Thixomat
Stephen Lebeau
VP Ventes et marketing
620 Technology Drive
Ann Arbor, MI, 48108
Tél. : (734) 995-5550

Thompson Aluminum Casting Co.
Brian Thomas
Business Operations Manager
5161 Canal Road
Cuyahoga Heights, OH, 44125
Tél. : (216) 206-2781

Volvo Buses de México
Cortés P. Salvador
Gestionnaire des ventes
Lago de Guadalupe 289
54900 Tultitlán, Estado de México
Mexique
Tél. : +52 (55) 58 64 37 46

ANNEXE B – RAPPORTS DE BODYCOTE

Cette annexe présente les rapports d'analyse de Bodycote sur des échantillons de magnésium, soit :

- Rapport No 04-02-168(A)

  ASTM E 162 Surface Flammability of "Extruded Alloy AZ31"

- Rapport No 04-02-168(B1)

  ASTM E 662 Rate of Smoke Generation of "Magnesium Alloy AM60B"

- Rapport No 04-02-168(B2)

  Bombardier SMP 800-C Toxic Gas Generation of "Magnesium Alloy AM60B"

- Rapport No 04-02-168(B3)
  Caloric Content of "Magnesium Alloy AM60B"

Bodycote MATERIALS TESTING CANADA INC.

BODYCOTE • 2395 SPEAKMAN DRIVE, MISSISSAUGA, ONTARIO, CANADA L5K 1B3 • TEL: (905) 822-4111 • FAX: (905) 823-1446

ASTM E 162 Surface Flammability of "Extruded Alloy AZ31"

A Report To:	**IC² Technologies Inc.** 4800 Rideau, Suite A Québec City, Québec G1P 4P4
Phone:	(418) 659-5005
Fax:	(418) 658-5336
Attention:	François Bergeron
Submitted By:	Fire, Flammability & Explosivity
Report No.	04-02-168(A) 2 pages + 1 appendix
Date:	March 30, 2004

ACCREDITATION Standards Council of Canada, Registration #1.

REGISTRATION ISO 9002-1994, registered by QMI, Registration #001109.

SPECIFICATIONS OF ORDER

Determine surface flammability in accordance with ASTM E 162, as per your P.O. #04-1001 and our Quotation No. 04-02-0000167 accepted March 23, 2004.

IDENTIFICATION

(BMTC sample identification number 04-02-S0168-1)

Solid, extruded, magnesium alloy material, approximately 2.3 mm in thickness, identified as "AZ31".

TEST RESULTS

ASTM E 162-02a

Surface Flammability of Materials Using a Radiant Heat Energy Source. (Is = Flame Spread Index).

	Es	Q	Is	Observations
1:	1.0	2.4	2	Specimens did not ignite.
2:	1.0	1.4	1	No flaming running or flaming dripping observed.
3:	1.0	1.4	1	
4:	1.0	2.0	2	
Rounded Average:			<5	
Specified Maximum:			35	No flaming running or flaming dripping

CONCLUSIONS

The magnesium alloy material identified in this report, when tested at an approximate thickness of 2.3 mm, meets The Federal Railroad Administration requirements as they pertain to surface flammability (ASTM E 162).

Note: This is an electronic copy of the report. Signatures are on file with the original report.

M. Laniel,
Fire, Flammability & Explosivity

Richard J. Lederle,
Fire, Flammability & Explosivity

Note: This report consists of 2 pages, including the cover page, that comprise the report "body". It should be considered incomplete if all pages are not present. Additionally, the Appendix of this report comprises a cover page, plus 1 page.

APPENDIX

(1 Page)

Summary of Test Procedure

Bodycote Materials Testing Canada Inc.

ASTM E 162-02a

Surface Flammability of Materials Using a Radiant Energy Source.

Four specimens, 6 x 18 inches in size, are pre-dried for 24 hours at 60°C and conditioned to equilibrium at 50 ± 5% relative humidity and 23 ± 3°C before testing.

Each specimen is mounted into a holder and inclined at 30° from the vertical in front of a 12 x 18 inch gas-fired radiant panel. The orientation of the specimen is such that ignition is forced near its upper edge by a pilot flame, and the flame front progresses downwards.

A factor derived from the rate of progress of the flame-front and the rate of heat liberation by the material under test is calculated as follows and then reported after rounding the average of the tests to the nearest multiple of 5:

$$Is = Fs \cdot Q$$

Where: Is is the flame spread index

Fs is the flame spread factor

Q is the heat evolution factor

Transit authorities generally specify a maximum Is acceptance criterion of 35 for general applications, and 100 for light diffusers, windows and transparent plastic windscreens.

Bodycote MATERIALS TESTING CANADA INC.

BODYCOTE • 2395 SPEAKMAN DRIVE, MISSISSAUGA, ONTARIO, CANADA L5K 1B3 • TEL: (905) 822-4111 • FAX: (905) 823-1446

ASTM E 662 Rate of Smoke Generation of "Magnesium Alloy AM60B"

A Report To: **IC² Technologies Inc.**
4800 Rideau, Suite A
Québec City, Québec
G1P 4P4

Phone: (418) 659-5005
Fax: (418) 658-5336

Attention: François Bergeron

Submitted By: Fire, Flammability & Explosivity

Report No. 04-02-168(B1)
3 pages + 1 appendix

Date: March 30, 2004

ACCREDITATION Standards Council of Canada, Registration #1.

REGISTRATION ISO 9002-1994, registered by QMI, Registration #001109.

SPECIFICATIONS OF ORDER

Determine rate of smoke generation according to ASTM E 662, as per your P.O. #04-1001 and our Quotation No. 04-02-0000167 accepted March 23, 2004.

IDENTIFICATION

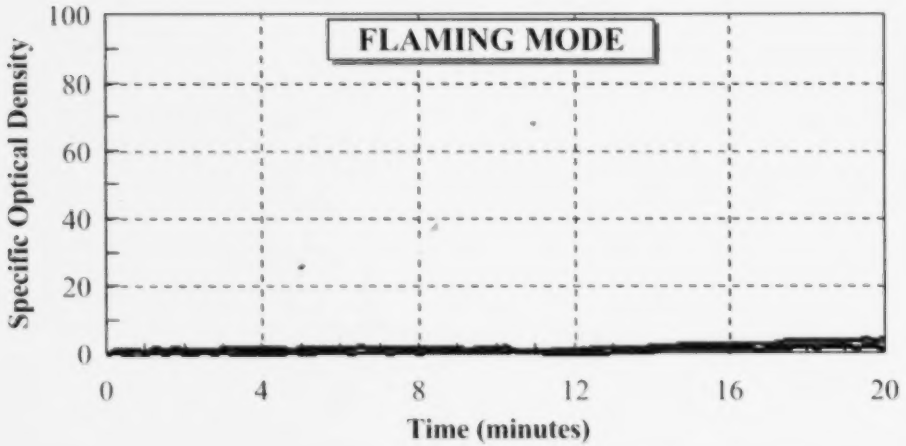
Solid, magnesium alloy material, approximately 4.3 mm in thickness, identified as "AM60B".

(BMTC sample identification number 04-02-S0168-2)

TEST RESULTS

ASTM E 662-03

Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials

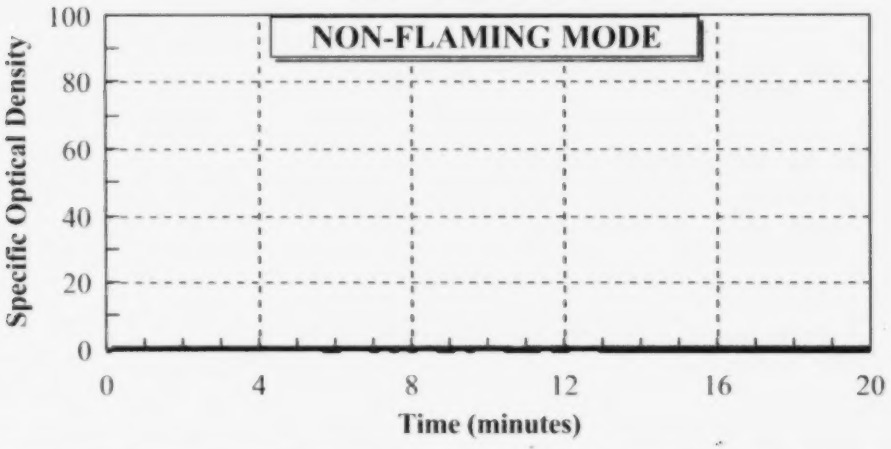


Flaming Mode	Test	#1	#2	#3	Average	Specified Maxima
Specific Optical Density at 1.5 minutes		2	1	1	1	100
Specific Optical Density at 4.0 minutes		2	1	1	1	200
Maximum Specific Optical Density		2	5	4	4	-
Maximum Corrected Optical Density		2	5	4	4	-

TEST RESULTS (Cont..)

ASTM E 662-03

Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials



Non-Flaming Mode	Test	#1	#2	#3	Average	Specified Maxima
Specific Optical Density at 1.5 minutes		0	1	0	0	100
Specific Optical Density at 4.0 minutes		0	1	1	1	200
Maximum Specific Optical Density		0	1	1	1	-
Maximum Corrected Optical Density		0	1	1	1	-

CONCLUSIONS

The solid magnesium alloy material identified in this report, when tested at an approximate thickness of 4.3 mm, meets the Federal Railroad Administration requirements as they pertain to rate of smoke generation (ASTM E 662).

Note: This is an electronic copy of the report. Signatures are on file with the original report.

I. Smith,
Fire, Flammability & Explosivity

Richard J. Lederle,
Fire, Flammability & Explosivity

Note: This report consists of 3 pages, including the cover page, that comprise the report "body". It should be considered incomplete if all pages are not present. Additionally, the Appendix of this report comprises a cover page, plus 1 page.

APPENDIX

(1 Page)

Summary of Test Procedure

Bodycote Materials Testing Canada Inc.

ASTM E 662-03

Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials (NBS Smoke Chamber)

This method of test covers a procedure for measuring the smoke generated by solid materials and assemblies in thickness up to and including 1 inch (25.4 mm). Measurement is made of the attenuation of a light beam by smoke (suspended solid or liquid particles) accumulating within a closed chamber due to nonflaming pyrolytic decomposition and flaming combustion. Results are expressed in terms of specific optical density (Ds), which is derived from a geometrical factor and the measured optical density (absorbance).

Specimens are dried for 24 hours at 60°C and conditioned to equilibrium at 50% RH and 23°C.

Three specimens, 3" square, are exposed to each mode of combustion. The % light transmittance during the course of the combustion is recorded. These data are used to express the quantity of smoke in the form of Specific Optical Density based on the following formula which assumes the applicability of Bouguer's law:

$$Ds = (V/AL)\cdot\log(100/T) = G\cdot\log(100/T) = 132\cdot\log(100/T)$$

Where: Ds = Specific Optical Density
T = % Transmittance
V = Chamber Volume (18 ft^3)
A = Exposed Area of the Sample (0.0456 ft^2)
L = Length of Light Path in Chamber (3.0 ft)
G = Geometric Factor

Among the parameters normally reported are:

$Ds_{1.5}$ - specific optical density after 1.5 minutes

$Ds_{4.0}$ - specific optical density after 4.0 minutes

Dm - maximum specific optical density at any time during the 20 minute test

$Dm_{(corr)}$ - Dm corrected for incidental deposits on the optical surfaces

Transit authorities generally specify a maximum Ds 1.5 of 100 and a maximum Ds 4.0 of 200 in either flaming or non-flaming test mode.

Bodycote MATERIALS TESTING CANADA INC

BODYCOTE • 2395 SPEAKMAN DRIVE, MISSISSAUGA, ONTARIO, CANADA L5K 1B3 • TEL: (905) 822-4111 • FAX: (905) 823-1446

Bombardier SMP 800-C Toxic Gas Generation of "Magnesium Alloy AM60B"

A Report To:	**IC² Technologies Inc.** 4800 Rideau, Suite A Québec City, Québec G1P 4P4
Phone:	(418) 659-5005
Fax:	(418) 658-5336
Attention:	François Bergeron
Submitted By:	Fire, Flammability & Explosivity
Report No.	04-02-168(B2) 3 pages + 1 appendix
Date:	March 30, 2004

ACCREDITATION Standards Council of Canada, Registration #1.

REGISTRATION ISO 9002-1994, registered by QMI, Registration #001109.

SPECIFICATIONS OF ORDER

Determine toxic gas production according to Bombardier SMP 800-C, as per your P.O. #04-1001 and our Quotation No. 04-02-0000167 accepted March 23, 2004.

IDENTIFICATION

Solid, magnesium alloy material, approximately 4.3 mm in thickness, identified as "AM60B".

(BMTC sample identification number 04-02-S0168-2)

TEST RESULTS

Bombardier SMP 800-C

Toxic Gas Generation

		Flaming Mode	Non-Flaming Mode	Specified Maxima
Carbon Monoxide (CO ppm)	at 1.5 minutes	<10	<10	-
	at 4.0 minutes	<10	<10	-
	at maximum	75	<10	3500
Carbon Dioxide (CO2 ppm)	at 1.5 minutes	200	<50	-
	at 4.0 minutes	1200	<50	-
	at maximum	9250	<50	90000

TEST RESULTS (Cont..)

Bombardier SMP 800-C

Toxic Gas Generation

	Flaming Mode	Non-Flaming Mode	Specified Maxima
Nitrogen Oxides (as NO2 ppm)	2	2	100
Sulphur Dioxide (SO2 ppm)	<1	<1	100
Hydrogen Chloride (HCl ppm)	<2	<2	500
Hydrogen Fluoride (HF ppm)	<2	<2	100
Hydrogen Bromide (HBr ppm)	<1	<1	100
Hydrogen Cyanide (HCN ppm)	<1	<1	100
Original Weight (g)	41.5	41.7	-
Final Weight (g)	41.4	41.7	-
Weight Loss (g)	0.0	0.0	
Weight Loss (%)	0.02	0.00	-
Time to Ignition (s)	Did not ignite		-
Burning Duration (s)	-	-	-

CONCLUSIONS

The solid magnesium alloy material identified in this report, when tested at an approximate thickness of 4.3 mm, meets Bombardier requirements as they pertain to toxic gas production (Bombardier SMP 800-C).

Note: This is an electronic copy of the report. Signatures are on file with the original report.

I. Smith,
Fire, Flammability & Explosivity

Richard J. Lederle,
Fire, Flammability & Explosivity

Note: This report consists of 3 pages, including the cover page, that comprise the report "body". It should be considered incomplete if all pages are not present. Additionally, the Appendix of this report comprises a cover page, plus 1 page.

APPENDIX

(1 Page)

Summary of Test Procedure

Bodycote Materials Testing Canada Inc.

Bombardier SMP 800-C

Toxic Gas Sampling and Analytical Procedures

Toxic Gas Generation

Gases produced for analysis are generated in a specified, calibrated smoke chamber during standard rate of smoke generation testing (typically ASTM E 662), in both flaming combustion and non-flaming pyrolytic decomposition test modes.

Carbon Monoxide (CO) and Carbon Dioxide (CO2)

CO and CO2 are monitored continuously during the 20 minute test using a non-dispersive infrared (NDIR) analyzer. Data are reported in ppm by volume at 1.5 and 4.0 minutes and at maximum concentration.

Acid Gas Sampling

HCN, HF, HCl, HBr, NOx and SO2 are sampled by drawing 6 litres of the chamber atmosphere through two midget impingers, each containing 10 ml of 0.25N NaOH, at a rate of 400 ml per minute. The 15 minute sampling period is commenced at the 4 minute mark. All determinations are performed in both the flaming and non-flaming modes and all data are reported in parts per million (ppm) by volume in air.

Analysis of Impingers for Hydrogen Cyanide (HCN)

Cyanide in the NaOH impinger, as NaCN, is converted to CNCl by reaction with chloramine-T at pH greater than 8 without hydrolyzing to CNO^-. After the reaction is complete, CNCl forms a red-blue colour on addition of a pyridine-barbituric acid reagent. Cyanide is quantified by spectrometric measurement of the increase in colour 578 nm. Reference: In-house SOP 00-13-SP-1216 based on ASTM Method D 2036-91

Analysis of Impingers for Hydrogen Fluoride (HF)

Fluoride, as NaF, in the NaOH impinger is determined using SPADNS colorimetry.

Reference: In-house SOP 01-13-SP-1295

Analysis of Impingers for Hydrogen Chloride (HCl) and Hydrogen Bromide (HBr)

Alkali halides (chloride and bromide) formed in the NaOH solution are measured using ion chromatography and conductivity detection. Reference: In-house SOP 93-T34-SP-007

Analysis of Impingers for Nitrogen Oxides (NOX)

Nitrite and nitrate formed in the alkaline solution are determined using ion chromatography and conductivity detection. The nitrite and nitrite results are combined and the total expressed as nitrogen dioxide (NO2).

Reference: In-house SOP 93-T34-SP-007

Analysis of Impingers for Sulphur Dioxide (SO2)

SO2 is trapped in the NaOH impinger as sulphite and sulphate ($SO3^{-2}$ and $SO4^{-2}$). Hydrogen peroxide is added to convert $SO3^{-2}$ to $SO4^{-2}$. Resulting sulphate is determined using ion chromatography and conductivity detection. Reference: In-house SOP 93-T34-SP-007

Bodycote MATERIALS TESTING CANADA INC

BODYCOTE • 2395 SPEAKMAN DRIVE, MISSISSAUGA, ONTARIO, CANADA L5K 1B3 • TEL: (905) 822-4111 • FAX: (905) 823-1446

Caloric Content of "Magnesium Alloy AM60B"

A Report To:	**IC² Technologies Inc.** 4800 Rideau, Suite A Québec City, Québec G1P 4P4
Phone:	(418) 659-5005
Fax:	(418) 658-5336
Attention:	François Bergeron
Submitted By:	Fire, Flammability & Explosivity
Report No.	04-02-168(B3) 8 pages + 1 appendix
Date:	March 30, 2004

ACCREDITATION Standards Council of Canada, Registration #1.

REGISTRATION ISO 9002-1994, registered by QMI, Registration #001109.

SPECIFICATIONS OF ORDER

Determine Effective Heat of Combustion according to ASTM E 1354 and derive Caloric Content, as per your P.O. #04-1001 and our Quotation No. 04-02-000167 accepted March 23, 2004.

IDENTIFICATION

Solid, magnesium alloy material, approximately 4.1 mm in thickness, identified as "AM60B".

(BMTC sample identification number 04-02-S0168-2)

SUMMARY OF TEST PROCEDURE

Three specimens, 100 mm x 100 mm in size, are conditioned to equilibrium at 50 ± 5% relative humidity and 23 ± 3°C before testing.

Each specimen is mounted into a holder and placed horizontally below a cone-shaped radiant heat source which has been previously set to emit a specified heat flux. A spark source is located 13 mm above the surface of the specimen in order to promote ignition in ambient air conditions, while a load cell continuously monitors specimen weight loss.

Exhaust gas flow rate and oxygen concentration are used to determine the amount of heat release, based on the observation that the net heat of combustion is directly related to the amount of oxygen required for combustion. The relationship is that approximately 13100 kJ of heat are released per 1 kg of oxygen consumed.

In addition to rate of heat release, other measurements include mass-loss rate, time to sustained flaming and smoke obscuration.

TEST RESULTS ASTM E 1354-03

Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products
Using an Oxygen Consumption Calorimeter

Heat Flux: 50 kW/m² Exhaust Flow Rate: 24.0 l/s

Testing was performed in the horizontal configuration and using the specimen holder edge frame.

	Test #1	Test #2	Test #3	Average
Specimen Thickness (mm)	4.1	4.1	4.1	
Initial Mass (g)	74.5	74.1	73.4	
Final Mass (g)	74.0	74.0	73.4	

Total Mass Loss (kg/m²)	0.05	0.00	0.00	0.02
Peak Mass Loss Rate (g/s·m²)	0.56	0.27	0.00	0.28
Average Mass Loss Rate (g/s·m²)	0.12	0.12	0.12	0.12

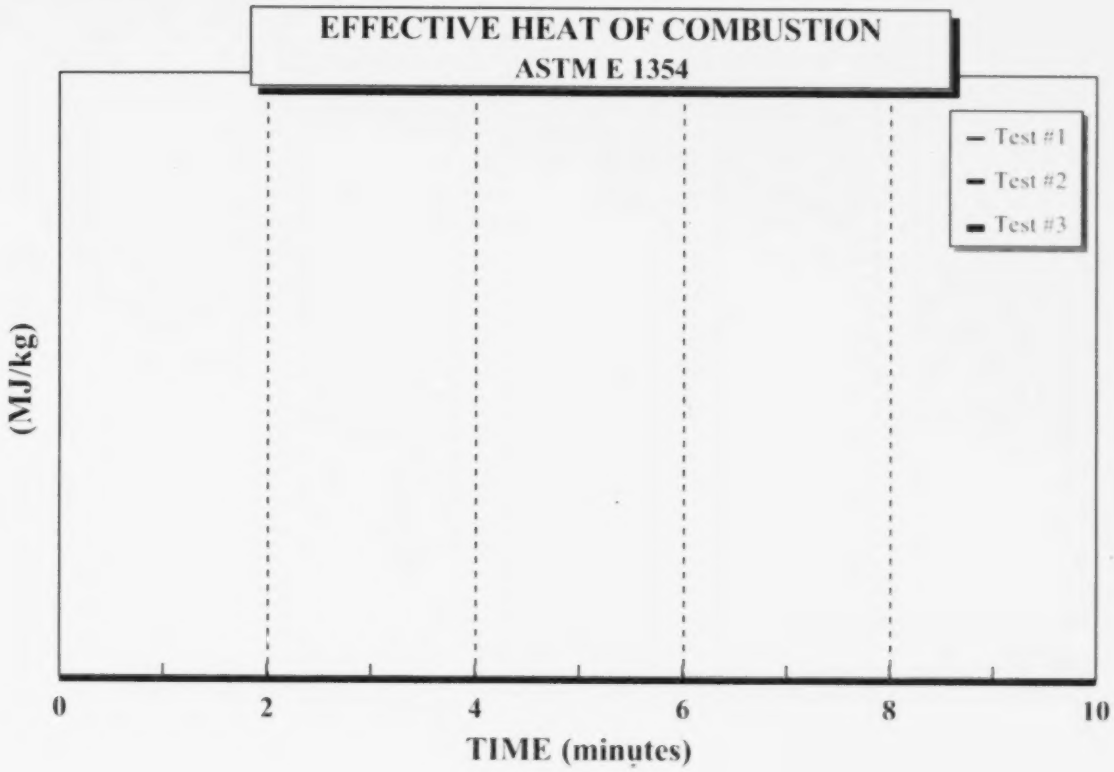
Time to Ignition (s)	-	-	-	-
Time to Flame-out (s)	-	-	-	-
Time of Peak Rate of Heat Release (s)	580	115	560	418
Peak Rate of Heat Release (kW/m²)	5.7	0.6	8.7	5.0
Average Rate of Heat Release (kW/m²)	0.7	0.0	0.4	0.4
Total Heat Released (MJ/m²)	0.40	0.00	0.25	0.22

Average Effective Heat of Combustion (MJ/kg)	-	-	-	-	*
Average Effective Heat of Combustion (BTU/lb)	-	-	-	-	*
Caloric Content (MJ/kg)	-	-	-	-	**
Caloric Content (BTU/lb)	-	-	-	-	**

Peak Extinction Area (m²/kg)	-	-	-	-
Average Extinction Area (m²/kg)	-	-	-	-

* Total heat produced per unit mass of material consumed
** Total heat produced per unit mass of material tested

TEST RESULTS (Cont..)

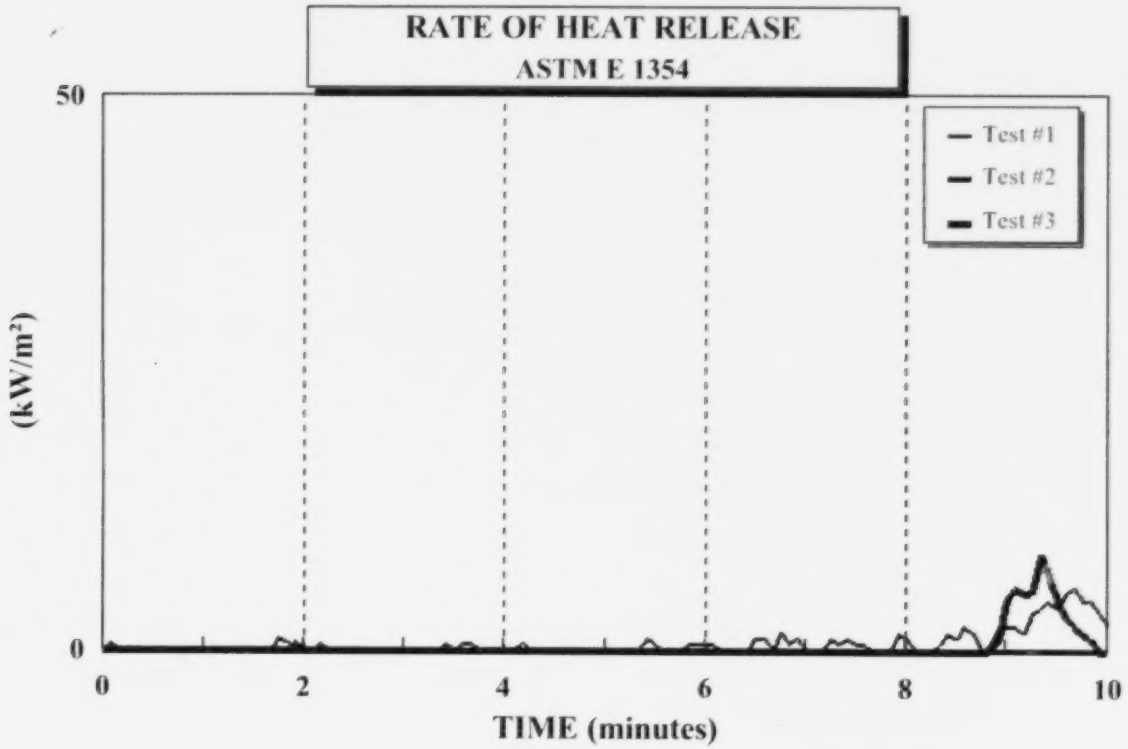


	Test #1	Test #2	Test #3	Average
Average Heat of Combustion (MJ/kg)*	-	-	-	-
Heat of Combustion @ 60 s (MJ/kg)**	-	-	-	-
Heat of Combustion @ 180 s (MJ/kg)**	-	-	-	-
Heat of Combustion @ 300 s (MJ/kg)**	-	-	-	-

* Averaged over the period starting when 10% of the ultimate mass loss occurred and ending at the time when 90% of the ultimate mass loss occurred.

** Averages over the 60, 180 or 300 second periods starting when 10% of the ultimate mass loss occurred.

TEST RESULTS (Cont..)

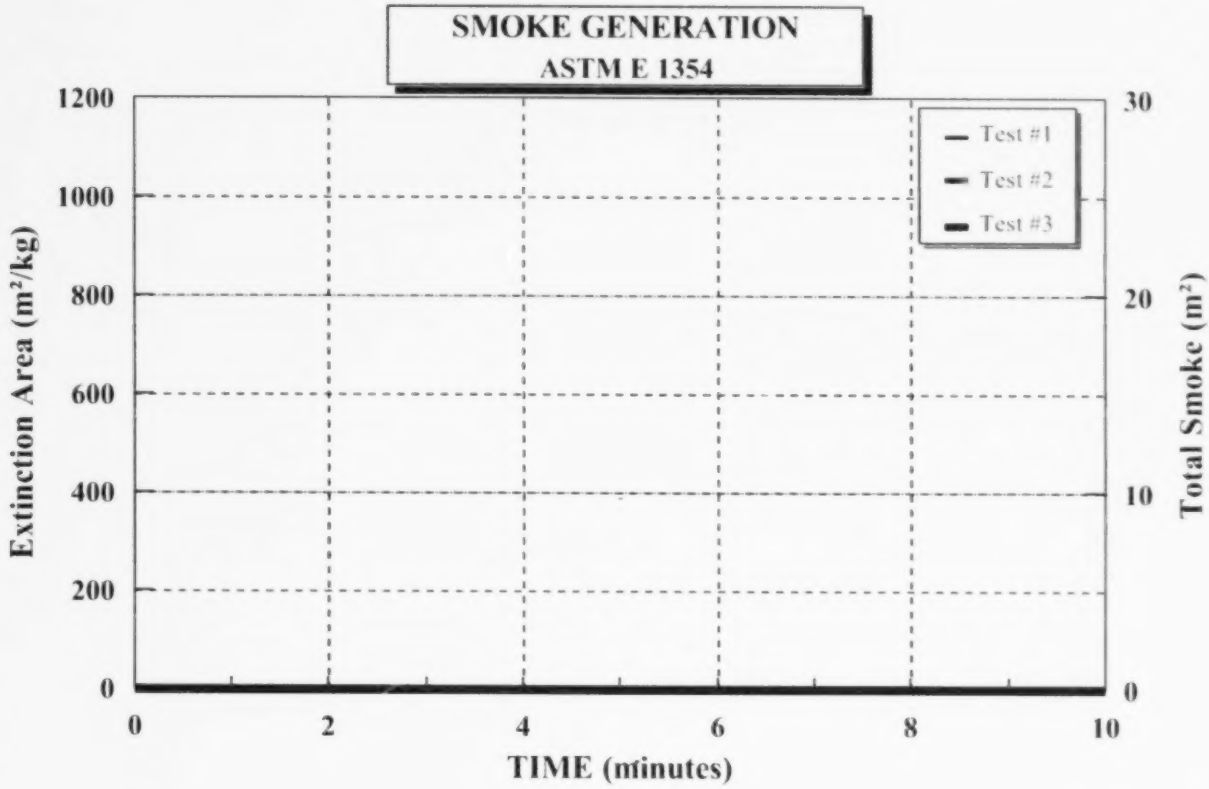


	Test #1	Test #2	Test #3	Average
Peak Rate of Heat Release (kW/m²)	5.7	0.6	8.7	5.0
Average Heat Release Rate (kW/m²)*	0.7	0.0	0.4	0.4
Heat Release Rate @ 60 s (kW/m²)**	0.0	0.0	0.0	0.0
Heat Release Rate @ 180 s (kW/m²)**	0.1	0.0	0.0	0.0
Heat Release Rate @ 300 s (kW/m²)**	0.1	0.0	0.0	0.0

* Averaged over the test period (from ignition to flameout).

** Averages over the first 60, 180 or 300 seconds after ignition.

TEST RESULTS (Cont..)

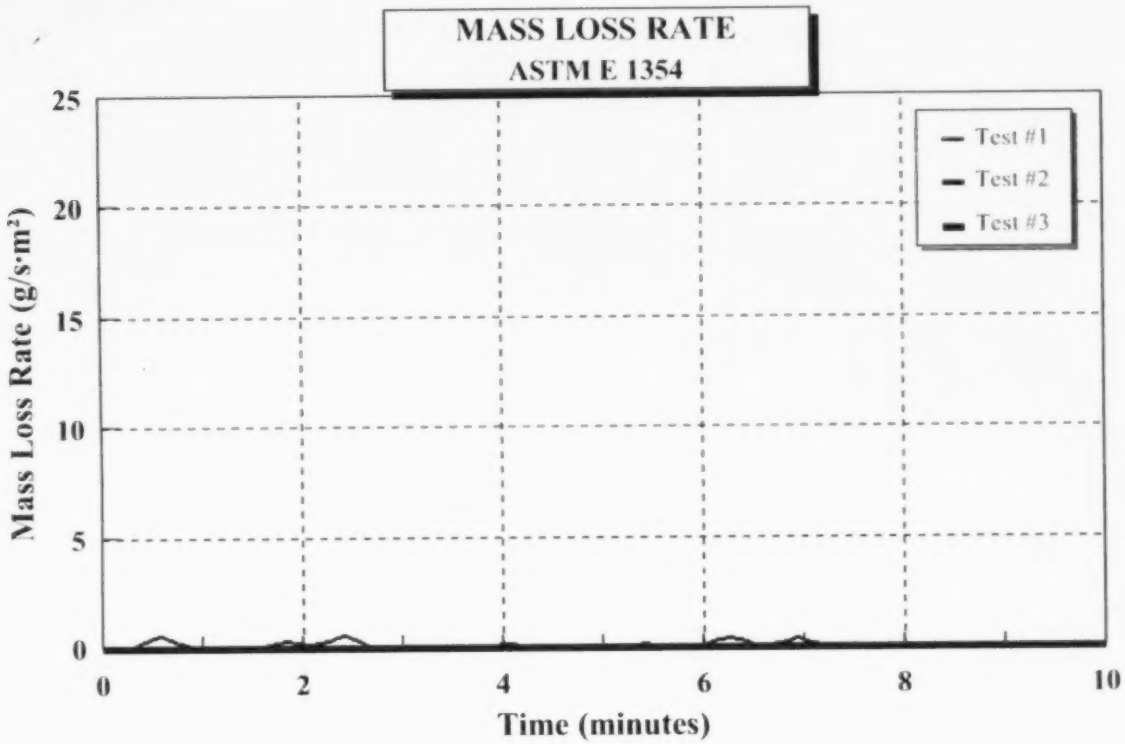


	Test #1	Test #2	Test #3	Average
Peak Extinction Area (m²/kg)	-	-	-	-
Average Extinction Area (m²/kg)*	-	-	-	-
Extinction Area @ 60 s (m²/kg)**	-	-	-	-
Extinction Area @ 180 s (m²/kg)**	-	-	-	-
Extinction Area @ 300 s (m²/kg)**	-	-	-	-
Total Smoke (m²)	-	-	-	-

* Averaged over the test period (from ignition to flameout).

** Averages over the first 60, 180 or 300 seconds after ignition.

TEST RESULTS (Cont..)



	Test #1	Test #2	Test #3	Average
Peak Mass Loss Rate (g/s·m²)	0.56	0.27	0.00	0.28
Average Mass Loss Rate (g/s·m²)*	0.12	0.12	0.12	0.12
Mass Loss Rate @ 60 s (g/s·m²)**	0.19	0.19	0.19	0.19
Mass Loss Rate @ 180 s (g/s·m²)**	0.17	0.17	0.17	0.17
Mass Loss Rate @ 300 s (g/s·m²)**	0.12	0.12	0.12	0.12

* Averaged over the period starting when 10% of the ultimate mass loss occurred and ending at the time when 90% of the ultimate mass loss occurred.

** Averages over the 60, 180 or 300 second periods starting when 10% of the ultimate mass loss occurred.

CONCLUSIONS

The magnesium alloy identified in this report, when tested at an approximate thickness of 4.1 mm, did not ignite or show signs of heat evolution. Data collection was continued for a time period of 10 minutes according to ASTM E 1354 at an imposed heat flux of 50 kW/m².

Note: This is an electronic copy of the report. Signatures are on file with the original report.

M. Garces,
Fire, Flammability & Explosivity

Richard J. Lederle,
Fire, Flammability & Explosivity

Note: This report consists of 8 pages, including the cover page, that comprise the report "body". It should be considered incomplete if all pages are not present. Additionally, the Appendix of this report comprises a cover page, plus 1 page.

APPENDIX

(1 Page)

ASTM E 1354 Definitions

Bodycote Materials Testing Canada Inc.

ASTM E 1354 DEFINITIONS

In evaluating the data produced by the oxygen consumption (cone) calorimeter, the following definitions and comments are offered:

Effective Heat of Combustion	This is the measured heat release divided by the mass loss for a specified time period and represents, therefore, the calorific value of the consumed portion only of the tested material. Caloric content under the test conditions can be derived by dividing the total heat released by the original mass of the material under test. It generally differs from the theoretical heat of combustion, since the latter involves complete combustion - a phenomenon which rarely takes place in an actual fire.
Time to Ignition	Also known as ignition delay time, this parameter provides a measure of a material's propensity to ignition as measured by the time to sustained ignition at a given heat flux. It can also be considered to be related to the volatility of the degradation products and the time required to achieve a critical fuel concentration in the vapour phase. This gasification rate is temperature dependent: the higher the imposed heat flux the shorter the time to ignition.
Heat Release Rate (HRR)	HRR is the heat evolved per unit time and is highly dependent on applied heat flux: the higher the flux the greater the HRR. HRR curves can fluctuate significantly with time and it is generally considered that the average HRR can be a better predictor of full-scale fire performance than the peak value.
Total Heat Release	This is the integrated area under the HRR curve over the test period, expressed in MJ/m^3. If one knows the surface area of a material used in a room or transit vehicle, this value is more properly used to estimate "potential heat load" than is the more commonly used "caloric content" based upon the weight of material used.
Mass Loss Rate	This is roughly correlatable with heat release rate because it is the rate at which the test material is degraded to produce combustible fuels. The peak mass loss rate and average mass loss rate are derivative terms generated by the load cell.
Extinction Area	This refers to the "yield" of smoke which is, through mathematical manipulation, expressed as an area per unit mass.

In addition to average values for the test, data averaged to the 60, 180 and 300 second marks after ignition are also typically provided. Where materials burn for different lengths of time, for example, it is more technically sound to compare the average heat release rates over the first 1, 3 or 5 minutes of burning than to compare the test average results which encompass differing time periods.